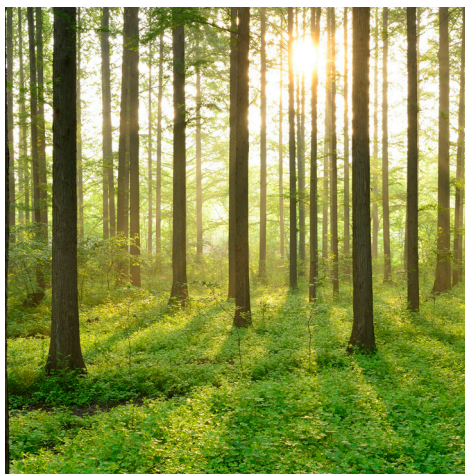


HÖG TILLRINNING I REGLERADE VATTENDRAG

RAPPORT 2016:320



Hög tillrinning i reglerade vattendrag

Beräkning av 100 års återkomsttid

KRISTOFFER HALLBERG, JONAS GERMAN, KATARINA LOSJÖ, JOHAN SÖDLING

ISBN 978-91-7673-320-2 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Syftet med projektet är att ge stöd åt arbetet med flödesdimensionering och speciellt beräkning av så kallad 100-års tillrinning. Rapporten pekar på möjligheter och svårigheter i tekniker som kan användas för att beräkna storlek och sannolikhet för höga tillrinnande flöden till dammanläggningar.

Projektutförare och författare till rapporten är projektledare Kristoffer Hallberg, Jonas German, Katarina Losjö och Johan Södling, samtliga vid SMHI.

Till projektet knöts en referensgrupp bestående av: Maria Bartsch och Anna Engström Meyer från Svenska Kraftnät, Cristian Andersson från Energiforsk, Claes-Olof Brandesten från Vattenfall Vattenkraft, Agne Lärke från Fortum, Björn Norell och Camilla Hamberg från Vattenregleringsföretagen, Sigrid Eliasson och Emma Wikner från Statkraft samt Martin Petersson från Uniper.

Projektet ingick i Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete med medverkan från vattenkraftföretag och Svenska kraftnät.

Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

Stockholm december 2016

Sara Sandberg

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

Frekvensanalys är internationellt sett en mycket vanlig metod för beräkning av dimensionerande flöde, däribland tillrinning med 100 års återkomsttid (HT100). Tekniken omgärdas av praktiska och principiella begränsningar, vilka båda är av större betydelse för tillämpningar i reglerade än i oreglerade vattendrag. I såväl svensk som internationell litteratur behandlas vattenregleringens inverkan på högflöden sparsamt och det saknas generell vägledning för hur hänsyn ska tas till regleringar vid beräkningar. Samtidigt konstateras att det är ett område av vikt att arbeta fram principer inom. Denna rapport bidrar till ökad kunskap om svårigheter och möjligheter när det gäller att beräkna återkomsttider för tillrinning i reglerade vattendrag.

I tillämpningsexempel visas nuvarande praxis och nya metoder för beräkning av HT100. Den för Sverige nya metoden med mixade frekvensfördelningar (TCEV-WG) tillför egenskaper som är intressanta för användning i reglerade vattendrag. Hydrologisk modellering med standardiserade regleringsrutiner är värdefullt för att förstå och göra beräkningar av höga flöden och bidrar med ett vattendragsperspektiv. I projektet har följande erfarenheter erhållits;

- Frekvensanalys av observationsdata är trots kända svagheter standardmetoden för att bestämma HT100.
- Beräkningsmetoder för HT100 bör kunna representera de processer som är framträdande och drivande för höga flöden i en reglerad flödesregim.
- Hydrologisk modellering med standardiserade regleringsrutiner kan ge konsistenta underlag för beräkning av ett alternativt HT100.
- Hydrologisk modellering kan identifiera högflödespotentialen under perioder som magasin kan förväntas vara fulla och därmed känsliga för höga tillrinningar. Erfarenhetsmässigt har flera högflöden inträffat samtidigt som fyllnadsgraden varit hög.

Metoder som undersökts men för närvarande inte rekommenderas är icke-parametrisk frekvensanalys (KDE) liksom modifierad klass I metodik. Naturlig flödesregim är i många fall alltför olik den reglerade flödesregimen för att vara ett rimligt underlag.

Rekommendationer;

- Frekvensanalys gynnas av flexibilitet i teknikval, dock bör frekvensfördelning och parameterskattningsmetod motiveras och dokumenteras.
- För reglerade vattendrag där standardmässig frekvensanalys inte fungerar väl trots stort dataunderlag kan mixade frekvensfördelningar, t.ex. TCEV-WG vara ett alternativ.
- Hydrologisk modellering med standardiserade regleringsrutiner är ett verktyg som visat potential och som med fördel utvärderas för fler vattendrag.

Summary

Flood frequency analysis is a popular approach to determine inflow design flood with return time of 100 years (HT100). There are practical and theoretical limitations, both of greater importance to applications in controlled flows compared to natural flows. River regulation and peak flows are seldom discussed in literature and guidelines sidestep the question important to hydrological design. At the same time the significance of the matter is acknowledged. This report contributes to greater understanding of the difficulties and opportunities regarding probabilistic estimates of inflow design flood in regulated rivers.

In applications are new methods compared to the standard approach. Mixed distributions (TCEV-WG) have shown properties sought for when analysing controlled flows. Hydrological modelling with standardised flood control strategies has proven powerful to increase understanding and calculate flood flows. Furthermore, the technique adds a catchment wide perspective. The project experience;

- At site frequency analysis is, despite known shortcomings, the standard method to calculate inflow with return time of 100 years.
- Methods used should be able to represent the processes for extreme flows in a controlled flow regime.
- Hydrological modelling with standardised flood control strategies is a tool providing large and consistent dataset for calculation of an alternative HT100
- Hydrological modelling with standardised flood control strategies may identify flood flow potential during autumn. Several floods have occurred during autumn when the storage is generally high.

Examined and not recommended techniques are non-parametric frequency analysis (Kerned Density Estimation) and derivate of the Swedish category I flood procedure. Reconstructed natural streamflow regime is in general too different to be of interest in a highly developed river.

Recommendations;

- Flood frequency analysis gain from flexibility, however frequency distribution and parameter estimation method should be motivated and part of documentation.
- Mixed distributions (TCEV-WG) may be of interest for controlled flows where standard approach does not perform well, although data is comprehensive.
- Hydrological modelling with standardised control strategies is a tool that has shown potential, hence applications in further rivers are encouraged.

Innehåll

1	Bakgrund	10
2	Metoder för beräkning av dimensionerande flöde	13
2.1	Ansatser för beräkning av dimensionerande flöde	13
2.2	Beräkning av dimensionerande flöde i Sverige	13
2.2.1	Historik	13
2.2.2	Nuvarande praxis	14
2.3	Beräkning av dimensionerande flöde internationellt	15
2.3.1	Beräkningsmetoder för HT100	15
2.3.2	Nationell praxis för dammanläggningar	17
3	Underlag	19
3.1	Observationsdata	19
3.2	Hydrologiska modeller	20
4	Metoder för beräkning av tillrinning med återkomsttid kring 100 år	22
4.1	Frekvensanalys av observationsdata	23
4.1.1	Enkla frekvensfördelningar	24
4.1.2	Mixade frekvensfördelningar	25
4.1.3	Icke-parametrisk frekvensfördelning	26
4.2	Frekvensanalys av alternativ flödesdata	26
4.2.1	Naturlig flödesregim	26
4.2.2	Standardiserad reglering	27
4.3	Modifierad metodik för flödesdimensionering Klass I	28
5	Erfarenheter från beräkning av tillrinning med återkomsttid kring 100 år	30
5.1	Frekvensanalys av observationsdata	30
5.1.1	Enkla frekvensfördelningar	30
5.1.2	Mixade frekvensfördelningar	32
5.1.3	Jämförelser av frekvensfördelningar	32
5.2	Frekvensanalys av alternativ flödesdata	39
5.2.1	Naturlig flödesregim	39
5.2.2	Standardiserad reglering	41
5.3	Modifierad metodik för flödesdimensionering klass I	48
5.3.1	Reducering av dimensionerande nederbördssekvens och dimensionerande snömagasin	49
5.3.2	Beräknad tillrinning vid reducerad nederbördssekvens	51
5.3.3	Beräknad tillrinning vid reducerad nederbördssekvens och reducerat snömagasin	52
6	Diskussion	55
6.1	Observationsdata	56
6.2	Hydrologisk modellering med standardiserad reglering	58
7	Slutsatser	59

8	Referenser	60
9	Ordlista	67

1 Bakgrund

För konstruktion eller riskbedömning i och omkring vattendrag behövs kunskap om förekomsten och storleken av höga flöden och korresponderande vattennivåer. Detta kapitel ger en introduktion till behovsbilden, utmaningar och nuvarande praxis för beräkning av dimensionerande flöde.

Kapacitet att bedöma förekomsten och storleken av höga flöden är fundamentalt för konstruktion och fysisk planering invid vatten samt för utformning av åtgärder mot översvämning. Det är önskvärt att kunna bestämma flödet som har en given sannolikhet att överskridas och vice versa, t.ex. vid hydrologisk design, riskanalys och hantering av översvämningsproblematik. I huvudsak styrs högflödeskaraktäristiken i ett vattendrag av klimatologiska och geografiska förhållanden, men vattenreglering kan vara av betydelse. I föreliggande rapport redovisas operationella metoder för bestämning av tillrinning med 1 % årlig sannolikhet att överskridas, vilket ofta benämns 100-års tillrinning eller HT100.

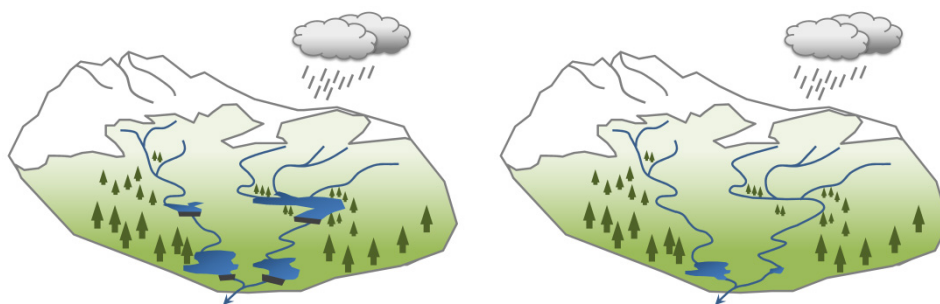
Traditionellt sett har beräkningar av dimensionerande för flöde begränsats till konceptuellt enkla metoder med låga krav på underlagsdata. Vattenkraftsindustrin har drivit på utvecklingen av metoder för att skatta högflöden med låg sannolikhet, upp till gränsen för det teoretiskt möjliga. Det stora antalet metoder som utvecklats speglar både komplexiteten i flödedimensionering och behoven i olika tillämpningar, t.ex. flöden med specifika återkomsttider, toppflöden eller fullständiga hydrografer. I Sverige används i huvudsak två metoder, frekvensanalys av observationer och hydrologisk modellering. I en frekvensanalys utnyttjas information ifrån tidigare högflöden för extrapolation till flöde med önskad sannolikhet. Vid hydrologisk modellering konverteras nederbörd och snösmältning till flöden genom att hydrologiska processer i avrinningsområdet och eventuella regleringar i vattendragen beskrivs. Vid bestämningen av dimensionerande flöden för dammanläggningar tillämpas en indelning i flödesdimensioneringsklasser, flödesdimensioneringsklass I och II, vilka beskrivs i riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar (Svensk Energi, 2015). Indelningen bygger på vilka konsekvenser som ett dammhaveri skulle kunna medföra i samband med höga flöden.

Tillrinning med 100-års återkomsttid ingår i kraven för avbördningskapacitet för dammanläggningar i både flödesdimensioneringsklass I och II, och i riktlinjerna finns rekommendationer för hur denna ska beräknas med lokal frekvensanalys (Svensk Energi, 2015). Frekvensanalys är ett samlingsbegrepp och utfallet av en beräkning beror både på platsspecifik underlagsdata och subjektiva teknikval såsom t.ex. frekvensfunktion och parameterskattningsteknik. För samma plats kan beräknat HT100 skilja sig åt beroende på hur, med vilket underlag och vem som har utfört beräkningen.

Inverkan av vattenreglering på höga flöden är ett välkänt men också svårhanterat problem. Vattenreglering används i denna rapport som *"all typ av omfördelning av vatten jämfört med naturliga förhållanden med påverkan på hur och när högflöden"*

inträffar". Inom vattenkraftssektorn är användandet av vattenmagasin exempel på reglering som påverkar flödeskaraktärstiken genom att exempelvis dämpa vårfloden och öka höstvattenföringen, medan strömkraftverk är exempel där högflödeskaraktärstiken lämnas oförändrad.

I oreglerade vattendrag avtar sannolikheten för händelsen succesivt med gradvis ökande flödesstorlek, ofta enligt en förutsägbar relation som kan visas med frekvensanalys. Högflödesstatistiken speglar sannolikheten för att de primära drivkrafterna, snösmältning och regn i kombination med markförhållanden, samspelar på ett sätt som genererar högflöden. Effekter på vattensystem vid utbyggnad illustreras i Figur 1.



Figur 1. Schematisk bild av reglerat (vänster) och naturligt vattensystem (höger) tillsammans med huvudsakliga drivkrafter för höga flöden, snösmältning och regn.

I vattendrag med hög regleringsgrad omfördelas vatten över året och på macroskala sker en styrning mot optimal kraftproduktion och minimal spilltappning. Observerad vattenföring är en kombination av hydrologiska drivkrafter och regleringsstrategier. Hydrologiska extremer är sällsynta och de flesta år speglar observerad vattenföring regleringsstrategier snarare än hydrologiska belastningar, vilket gör det vanskligt att bedöma risken eller potentialen för höga flöden. Omfattande reglering "maskerar" ofta måttliga högflöden och kan bidra till en överaskningseffekt (Bergström, 1999) när höga flöden som överstiger regleringsmöjligheterna inträffar. Med standardmetoden (Klemeš, 1993) för frekvenanalys menas i denna rapport *"det traditionella förfarandet att anpassa parametrarna för en känd sannolikhetsfördelning till observationsdata och extrapolera till sökt återkomsttid"*, vilket även är metodiken i svenska riktlinjer (Svensk Energi, 2015).

Viktiga orsaker till att det i reglerade flödesregimer är svårt att beräkna HT100 med standardmetoden för frekvenanalys är;

- **Observationsseriens längd**
Mätdata från en anläggning är ofta begränsad till driftstiden. Korta serier innehåller få extrema situationer att dra slutsatser ifrån vilket gör analysen osäker.
- **Observationsseriens kvalité**
Osäkerheten i flödesbestämningen ökar i regel med storleken på flödet, d.v.s de flöden som är viktigast för analysen är minst tillförlitliga.

- **Observationsseriens stationaritet och homogenitet**

Frekvenanalys förutsätter generellt att data kommer från ett system som inte förändras. Data bör alltså representera nuvarande utbyggnadsgrad och regleringsrutiner, vilket påverkar underlagsmaterialets storlek. Effekter av förändringar i markanvändning och klimat är hittills liten i serier för de flesta anläggningar.

- **Skevhets och tröskeleffekter i observationsserien**

Principerna för vattenreglering syns ofta i högflödesstatistiken genom att flöden i låga intervall är överrepresenterade liksom förekomsten av tröskeleffekter. Detta ger data som svårigen kan beskrivas av standardmetoden för frekvensanalys.

De första tre av ovanstående punkter är välkända, medan den sistnämnda har fått lite utrymme i litteraturen och diskuteras vidare i avsnitt 5.1.

Flera vägledning (IACWD, 1982; Svensk Energi, 2015) nämner reglerad vattenföring explicit som en situation då tillämpning av statistisk frekvensanalys är osäker. Det saknas emellertid generella principer och råd för hur effekten av regleringar kan värderas eller vägas in. För generell användning söks ofta metoder för optimal skattning och symmetrisk osäkerhet kring beräknat HT100. Vid flödesdimensionering av dammanläggningar är det dock angeläget att HT100 inte underskattats eftersom det kan få allvarliga konsekvenser och medföra stora kostnader.

Det finns flera utmaningar i att bestämma sannolikheten för höga flöden i reglerade vattendrag. En typ av frågeställning är av teknisk/matematisk natur och relaterar till observerad flödesinformation från reglerade vattendrag och vilka tekniker som analyserar denna bra. Andra frågeställningar av mer principiell karaktär är huruvida observationsdata från reglerade vattendrag innehåller tillräcklig information för att bedöma potentialen för höga flöden i den reglerade flödesregimen. Exempel på principiella frågor som diskuterats tidigare är;

- Tillrinning vs tappning (Sundby & Lindström, 1996)
- Naturliga vs reglerade högflöden (Sundby & Lindström, 1996)
- Årsvis eller säsongsvisa högflöden (German m.fl, 2014)
- Tillrinning villkorad med fyllnadsgrad i magasin (German m.fl, 2014)

Historiska högflöden är av stort intresse och sedan 1990-talet har det inträffat ett flertal högflödessituationer som lyft frågan om vattenregleringens roll (Bergström, 1999; Svenska kraftnät, 2001) och föranlett djupare analyser (Arheimer & Lindström, 2015; Arheimer & Lindström, 2014; Lindström, 1999; Lindström & Bergström, 2000; Wilson mfl. 2010) För Sverige konstateras att såväl förekomsten som storleken av höga flöden är stabil (Arheimer & Lindström 2015, Lindström, 2011) eller något avtagande (Wilson mfl, 2010) samt att olika trendanalyser är känsliga för valet av tidsperiod (Lindström & Bergström, 2002).

Det har förekommit flera olika sätt att beräkna HT100 och såväl rekommendationer som praxis har skiftat sedan de första riktlinjerna för beräkning av dimensionerande flöde gavs ut av Flödeskommitén år 1990. Mot denna bakgrund är det intressant att sammanställa internationellt förekommande metoder och sammanställa de förändringar som skett för svenska tillämpningar.

2 Metoder för beräkning av dimensionerande flöde

Behovet av att kunna bedöma förekomsten av och storleken på extrema flöden har föranlett utveckling av ett stort antal beräkningsmetoder. Med utgångspunkt i olika bakomliggande koncept och olika typer av underlagsdata, kan extrema flöden beräknas utifrån olika perspektiv och behovsbilder. Kapitlet ger en introduktion till metoder som används operationellt för beräkning av dimensionerande flöde i Sverige och internationellt, med fokus på dammanläggningar.

2.1 ANSATSER FÖR BERÄKNING AV DIMENSIONERANDE FLÖDE

Flödesdimensionering omfattar ett stort antal tekniker för att kvantifiera storleken av och sannolikheten för höga flöden. Traditionellt sett har konceptuellt enkla metoder med begränsade krav på indata använts (Sayers m.fl, 2014), delvis för att möjliggöra ett brett tillämpningsområde. Vanligen bygger teknikerna på analys och extrapolering av vattenföringsobservationer eller beskrivning av bakomliggande processer som genererar höga flöden. De vanligaste ansatserna är analys av enskilda händelser, statistisk analys av multipla händelser (t.ex. frekvenanalys av observationer), antaganden om fysikaliska begränsningar samt hybrider mellan statistiskt baserade och processbaserade ansatser (t.ex. modellering). Beroende på sökt säkerhetsnivå i flödesdimensioneringen behövs olika metoder. För att beräkna sannolikheten för flöden av samma storleksordning som de hitills högsta dokumenterade höglödessituationerna, används ofta extrapolationsmetoder baserade på mätdata. För att bestämma flöden med mycket låg sannolikhet används ofta metoder som beskriver drivkrafterna för höga flöden konceptuellt eller processbaserat, eftersom dokumentation eller indikationer av flödeshändelser av sådan extrem storlek sällan finns tillgängligt.

2.2 BERÄKNING AV DIMENSIONERANDE FLÖDE I SVERIGE

2.2.1 Historik

Svenska riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar publicerades i Flödeskommitténs slutrapport (Flödeskommittén, 1990). Det konstaterades att det i Sverige historiskt hade saknats fastlagda regler för hur dimensionerande flöden för dammar och utskov skulle beräknas. Praxis för beräkning av dimensionerande flöde var högsta uppmätta avrinning med ett påslag av 10-20% (Flödeskommittén, 1990), vilket i praktiken ofta innebar ett flöde med en årlig sannolikhet att överskridas om ca 1 %. Flödeskommittén konstaterade också att det var en svaghet att beräkningarna baserats på avrinning från och inte tillrinning till magasin.

Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar har sedan första utgåvan 1990 försetts med tillägg och reviderats år 2007 och år 2015.

Den huvudsakliga innebörden är i stort oförändrad sedan första utgåvan och syftet med tilläggen har i första hand varit förtydliganden samt anvisningar om dokumentation och förhållningssätt till ett klimat i förändring. I riktlinjerna används en indelning av dammar i tre flödesdimensioneringsklasser I, II, III, vilka korresponderar mot konsekvenser ett dammhaveri skulle kunna medföra. Flödesdimensioneringsklass I (FLK I) tillämpas för dammar som vid haveri skulle kunna medföra de mest allvarliga konsekvenserna. I riktlinjerna beskrivs två typer av flödesberäkningar;

- **Hydrologisk modellering**
Beräkning av flöde med en hydrologisk modell genom att simulera flödesresponsen för extrem nederbörd under särskilt ogynnsamma förhållanden. Ingår i avbördningskravet för dammar i flödesdimensioneringsklass I
- **Statistisk frekvensanalys**
Beräkning av tillrinning med återkomsttid av 100 år med frekvensanalys. Ingår i avbördningskravet för dammar i flödesdimensioneringsklass I och II.

Sedan riktlinjernas första upplaga 1990 har det förekommit fyra metoder för att beräkna det s.k. "100-årsflödet", se Tabell 1.

Tabell 1. Metoder för beräkning av 100-årsflöde

Metod för beräkning av 100-årsflöde	Kommentar
Frekvensanalys av observerad tillrinningsdata	Nuvarande rekommendation
Frekvensanalys av observerad tillrinningsdata inklusive flöde i FLK I tilldelat återkomsttiden 10 000 år	Utgick genom förtydligande av riktlinjerna (2007)
Frekvensanalys av observerad tappningsdata	Utgick genom förtydligande av riktlinjerna (2007)
Flöde i FLK I skalerat till 50 %	Ströks ur riktlinjerna av VASO dammkommitté (1995)

Begreppet "100-årsflöde" och förkortningarna Q100, HQ100 har använts för både beräkningar på tillrinnings- och tappningsdata vilket medför missförstånd. Terminologin har under senare år förtydligats så att "tillrinning med 100-års återkomsttid" och förkortningen HT100 används.

Kännedom om olika synsätt och metoder som förekommit för att beräkna ett "100-årsflöde" är viktigt för att värdera tidigare beräkningar som kan vara en del i utredningar kring och dokumentationen för dammanläggningar.

2.2.2 Nuvarande praxis

Nuvarande svenska riktlinjer (Svensk Energi m.fl., 2015) ger rekommendationer för beräkning av tillrinning med 100-års återkomsttid. I korthet;

- Beräkningen av 100-årsflödet grundas på tidsserier av tillrinningsdata till det aktuella magasinet. Extrapolering till önskad återkomsttid för flödet sker genom frekvensanalys.

- En frekvensfördelningsfunktion anpassas till en serie bestående av varje års högsta tillrinningsvärde, varvid flödet med en återkomsttid på 100 år beräknas.
- För svenska förhållanden används ofta någon av frekvensfördelningarna Gumbel, Gamma eller Log-normal, alla med två parametrar.

Det konstateras att frekvensanalys är behäftad med osäkerhet och att valet av tidsperiod, fördelningsfunktion och regleringar påverkar resultaten. För att bilda en uppfattning om osäkerheten i beräkningen föreslås användandet av flera olika tidsperioder, fördelningsfunktioner samt beräkning av konfidensgränser. Vidare konstateras att underlagsdata från platsen i fråga bör vara längre än 50 år och att kortare serier medför ökande osäkerheter. Om vattenföringsobservationer saknas för den aktuella platsen, får beräkningarna utföras med ledning av uppgifter om vattenföringen i annat avsnitt av det aktuella vattendraget eller i något närbeläget vattendrag.

2.3 BERÄKNING AV DIMENSIONERANDE FLÖDE INTERNATIONELLT

Dammsäkerhet är i många länder reglerad i nationell lagstiftning (Bradlow m.fl, 2002; Sayers m.fl, 2014) och inkluderar ofta krav på hantering av höga flöden. Metoder för beräkning av dimensionerande flöde är i mindre utsträckning specificerade och styrningen kan variera mellan lagar, förordningar och riktlinjer (Sayers m.fl, 2014). I flertalet länder används Probable Maximum Flood (PMF) (England, 2011), men denna teknik diskuteras inte i denna rapport eftersom PMF är av en storleksordning som vida överstiger HT100.

Utöver dammsäkerhetsändamål används bestäms dimensionerande flöde även i andra verksamheter. I en europeisk studie, European Science Foundation COST Action ES0901 (Castellarin m.fl, 2012), har nationell praxis för frekvensanalys sammanfattats för Belgien, Bulgarien, Cypern, Danmark, Finland, Frankrike, Grekland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Nederländerna, Norge, Polen, Serbien, Slovakien, Slovenien, Spanien, Storbritannien, Tjeckien, Turkiet, Tyskland, Ungern och Österrike.

2.3.1 Beräkningsmetoder för HT100

Flertalet internationellt förekommande metoder kan användas för att beräkna tillrinning med 100-års återkomsttid, även om deras tillämpningsområde är större.

Frekvensanalys

Frekvensanalys av observationsdata baseras på ansatsen att förekomsten av och storleken på historiskt inträffade högflöden kan extrapoleras för att erhålla flöden med sökt sannolikhet, exempelvis HT100. Metodiken är väldokumenterad (Coles, 2001; WMO, 2009; Stedinger, 1993) och ingår i flertalet riktlinjer (IACWD, 1982; NVE, 2011; Svensk Energi, 2015; Isomäki, 2012; CDA 2007). Frekvensanalys kan klassificeras som lokal (eng. *at-site*) eller regional (eng. *regional*), där lokal tillämpning är att föredra i reglerade vattendrag. Vidare skiljs mellan parametriska respektive icke-parametriska metoder.

GRADEX

GRADEX-metoden (FrCOLD, 1994) bygger på ansatsen att höga flöden korrelerar med extrem nederbörd och sannolikheten för extrem nederbörd beskrivs av en exponentialfunktion med en formparameter. För nederbördssituationer överstigande ett givet tröskelvärde antas att avrinning genereras utan förluster. Frekvensfördelningen för höga flöden kan således extrapoleras med samma formfaktor som nederbörden. GRADEX-metoden utvecklades under 1960-talet och har fått stor spridning.

SCHADEX

SCHADEX beskrivs som en "semi-kontinuerlig" stokastisk metod som simulerar höglöden som isolerade händelser i kombination med kontinuerlig avrinningsmodellering (Paquet, 2013). Storskaliga mönster för extrem nederbörd, s.k. Multi-Exponential Weather Pattern distribution (Garavaglia m.fl., 2011) är nödvändig indata. Typiska resultat från beräkningar med SCHADEX är säsongsvisa och månadsvisa sannolikhetsfördelningar för flöden och statistik för tusentals simulerade höglödeshändelser vilket ger möjlighet även till analys av volymer. Metoden är sedan år 2008 standard inom Electricité de France (EDF) för dimensionering av utskovskapacitet. För nordiska förhållanden finns tillämpningar i Norge (Lawrence m.fl., 2014).

SEFM

Stochastic – Event Based Precipitation Runoff Modelling (SEFM) (MGS, 2001) är en metod som varierar drivdata och parametrar till en hydrologisk modell med stokastiska Monte Carlo-metoder. SEFM kan användas med olika hydrologiska modeller. Tillämpningar i USA och i Kanada har hittills inkluderat UBCWM, HEC-1 och WATFLOOD (Sayers m.fl., 2014). Den hydrologiska modellen kan ta hänsyn till beskrivning av regleringar i uppströms magasin (USACE, 2005).

SHYPRE

Simulated Hydrographs for Flood Probability Estimation (SHYPRE) kombinerar en stokastisk vädergenerator som genererar nederbördssekvens (hyetograf) med en hydrologisk modell som beräknar avrinning. Nederbördssekvenser skapas stokastiskt baserat på sju kriterier som beskriver minsta storlek, antal händelser och relationer mellan maximal intensitet och total regnvoly. Den hydrologiska modellen har två parametrar som styr initialförhållanden och koncentrationstiden för området. Med exempel från Frankrike diskuteras modellansatsen av Arnaud & Lavabre (2002).

Flood Estimation Handbook- Revitalised Hydrograph Method (ReFH)

ReFH (Kjeldsen, 2007) är en händelsebaserad metod som använder en hydrologisk modell för att beräkna avrinning utifrån designnederbörd med specificerad varaktighet och sannolikhet. ReFH är en vidareutveckling av tidigare metodik i Flood Estimation Handbook (FEH) och designnederbörd genereras av FORGEX-modellen genom empiriska samband för intensitet-varaktighet-frekvens (Faulkner, 1999). Den hydrologiska responsen styrs i ReFH modellen med parametrar som representerar nederbördsförluster och markegenskaper, tidsfördröjning och egenskaper för basflödets respons. Parametervärden knyts i allmänhet till

karaktären på avrinningsområdet och tillämpningar av FEH sker med stöd av ett datorprogram CEH(2009). ReFH används i huvudsak i Storbritannien.

2.3.2 Nationell praxis för dammanläggningar

Finland

Riktlinjerna "Dam Safety Guide" (Isomäki, 2012) ersätter föregångaren "Dam Safety Code of Practice" från 1997. Flödesdimensionering följer en indelning av dammar i konsekvensklasser. Lokal frekvensanalys (s.k. at-site) m.h.a Gumbelfördelning är normen för platser med serier av observerad vattenföring som överstiger 20 år. För platser med korta mätserier nämns frekvensanalys baserat på närliggande stationer och användning av hydrologisk modellering som alternativ. Tabeller fastställer skalfaktorer mellan Q100, Q5000 och Q10000 för huvudavrinningsområden. De svenska riktlinjerna för beräkning av klass-I flöde har med mindre modifiering tillämpats även i Finland (Isomäki, 2012; Veijalainen & Vehviläinen, 2008).

Frankrike

Flödesdimensionering i Frankrike har i allmänhet baserats på sannolikhetsbaserade metoder såsom frekvensanalys. Sedan 1960-talet finns metoder som delvis baseras på extrem nederbörd, vilket är fördelaktigt för områden där tillgång till hydrologisk mätdata är liten. Rekommendationer för mindre dammar från FrCOLD (2002) lyfter fram att flödesdimensionering inte enbart bör baseras på observationer utan pekar på GRADEX, AGREE eller PMF som metoder för beräkning av flöden med återkomsttider mellan 100-10 000 år för mindre dammar. I en uppdaterad vägledning från FrCOLD (2013) nämns SHYPRE, SPEED, SCHADEX för beräkning av dimensionerande flöde. Sedan år 2008 används SCHADEX metoden som standardverktyget för design av utskov av Electricité de France (EDF) (Paquet m.fl., 2013)

Kanada

Dammsäkerhetsarbetet i Kanada regleras inom respektive provins och vägledning från Canadian Dam Association (CDA, 2007) har stort genomslag och kan betraktas som icke-officiell standard (Donnelly, 2009). För flödesdimensionering används PMF eller frekvensanalys beroende på anläggningens riskklassificering. Vid frekvensanalys används i första hand data från oreglerade mätstationer och regional analys. Valet av frekvensfördelning eller parameterskattningsmetod styrs inte i detalj men GEV, log-normal tillsammans med MOM, MLE eller L-moments är vanligt förekommande. Tillämpningar med SCHADEX och SEFM redovisas av Sayers m.fl. (2014).

Storbritannien

De två mest inflytelserika publikationerna på flödesdimensionering i Storbritannien har varit Flood Studies Report (FSR) (NERC, 1975) och Flood Estimation Handbook (FEH) (IH, 1999). En regional ansats för frekvensanalys är ett bärande element i FEH. I en revision av vägledningen (Kjeldsen m.fl., 2008) föreslås förbättringar främst inom de regionala metoderna.

Norge

Riktlinjerna för flödesdimensionering "Retningslinjer for flomberegninger" (NVE, 2011) följer en indelning av dammar i konsekvensklasser. För dammar associerade med stora risker sker flödesdimensionering med en deterministisk metod för största möjliga flöde (QPMF). Dammanläggningar i lägre konsekvensklasser flödesdimensioneras med sannolikhetsbaserade metoder (Q1000, Q500 samt Q50) eller en kombination av dessa två ansatser. För extremvärdesanalys föreskrivs inte frekvensfördelningen, men Gumbel och General Extreme Value (GEV) framhålls som lämpliga kandidater. Riktlinjerna fordrar en genomgång av det hydrologiska underlaget. Proceduren omfattar kontroll av avbördningskurvans övre register samt analys av de mest extrema nivåmätningarna för att eliminera fel i mätning och registrering (Hisdal m.fl., 2013). En dimensioneringsberäkning ska även åtföljas av dokumentation där en kvalitetsvärdering av det hydrologiska underlaget ingår.

Metodiken för flödesdimensionering i Norge har genomgått en genomlysning (Wilson, 2011) där parameterskattningsmetoden probability weighted moments (PWM) förordas om dataunderlaget är litet. Efterföljande projekt har utvärderat förslag på förbättringar genom systematiska jämförelser av statistiska metoder för bland annat frekvensanalys, parameterskattning och multivariat analys (Hisdal m.fl., 2013). Även tekniker för regional frekvensanalys och beräkningsmetoder såsom GRADEX och SCHADEX (Hisdal m.fl., 2013; Lawrence m.fl., 2014) har utvärderats.

USA

I USA förekommer i huvudsak två metoder för flödesdimensionering; frekvensanalys och Probable Maximum Flood (PMF) (England, 2011). Traditionell flödesdimensionering har varit fokuserad på avbördningskapacitet givet en föreskriven tillrinning, vanligtvis PMF (US Bureau of Reclamation, 1999; FEMA, 1998). Sedan mitten av 1990-talet har ansatser baserade på hydrologisk risk framhållits av Bureau of Reclamation och Corps of Engineers vilket ökat användningen av metoder som kan ge en bredare bild av hydrologiska risker och speciellt återkomsttider för höga flöden. Bland de vanliga beräkningsmetoderna nämns GRADEX, SEFM och TREX (Englandm.fl., 2007). Hydrologiska riskkurvor (eng. *Hydrological Hazard Curves*) (US Bureau of Reclamation, 2006) presenterar samlat både maximal tillrinning och tillrinnande volym.

Återkomsttider för flöden beräknas enligt nationella riktlinjer, allmänt känd som Bulletin 17B (IACWD, 1982). En revision ges ut under 2016 under namnet Bulletin 17C (England, 2015). Liksom tidigare föreskrivs log-pearson typ3 fördelning för frekvensanalys och riktlinjerna avser inte reglerade vattendrag. De grundläggande principerna ligger fast även i revisionen och uppdateringar sker bland annat inom metoderna för hanteringen av låga flöden, parameterskattning och konfidensintervall, såsom tidigare aviserats (England, 2011). Reglerade flödesregimer och mixade fördelningar pekas ut som områden där fortsatt metodutveckling krävs (England, 2015).

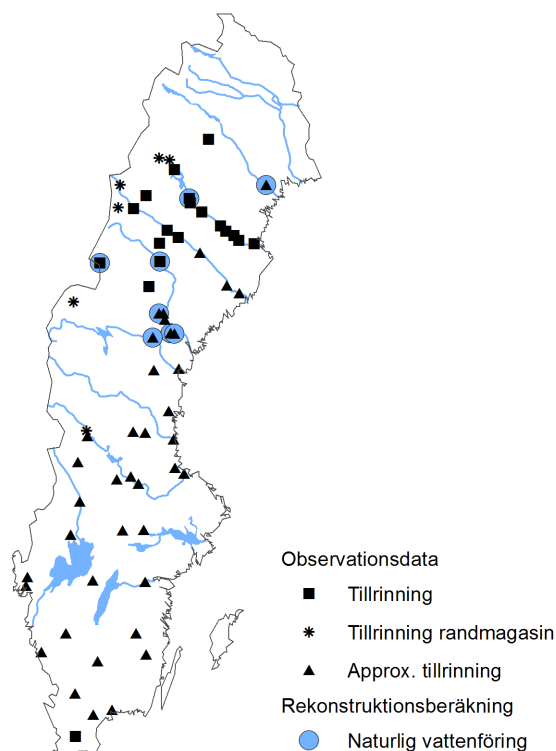
3 Underlag

I detta kapitel beskrivs det underlag som använts för att utvärdera metoder för beräkning av tillrinning med hundra års återkomsttid. Underlagsdata består dels av tidsserier av vattenföring, tappning eller tillrinning, men också hydrologiska beräkningsmodeller för dammanläggningar.

Beräkningar av 100-årsflöde är platsspecifik och baseras på platsspecifikt underlag. För att värdera olika metoders prestanda samt för- och nackdelar behövs underlag som täcker in olika flödesregimer, storlek på avrinningsområden och olika regleringsgrad. För frekvensanalys ska tillrinning normalt sett användas som underlag (Svensk Energi, 2015). Tillrinningsdata är emellertid mycket mindre tillgängligt än tappningsdata eller vattenföringsdata. I denna studie används flera olika former av underlag d.v.s. utöver tillrinningsserier även serier för tappning. Som referens används även data från oreglerade vattendrag och rekonstruerad naturlig vattenföring.

3.1 OBSERVATIONSDATA

SMHI och de i projektet medverkande företagen har bistått med hydrologiska tidsserier enligt Figur 2 och Tabell 2. Serierna för randmagasin särskiljs eftersom denna tillrinning är oreglerad. För anläggningar där magasineringen bedömts försumbar vid höga tillrinningar används klassen approximativ tillrinning, även om data i strikt mening är tappningsdata.



Figur 2. Tidsserier med tillrinning eller rekonstruerad naturlig vattenföring.

Tabell 2. Tidsserier med tillrinning.

Typ av tidsserie	Antal punkter
Tillrinning	17 st
Tillrinning randmagasin	6 st
Approximativ tillrinning	39 st
Naturlig vattenföring (rekonstruerad)	8 st

3.2 HYDROLOGISKA MODELLER

En hydrologisk modell är en beräkningsmodell som kan beräkna vattenföring i vattendrag och tillrinning till magasin. Enligt riktlinjerna (Svensk Energi m.fl., 2015) för beräkningarna av flöden i flödesdimensioneringsklass I ska förloppet av det dimensionerande flödet simuleras med tillämpning av vedertagen hydrologisk modellteknik. I praktiken har den hydrologiska HBV-modellen (Lindström m.fl., 1997) kommit att bli standard.

HBV-modellen har utvecklats vid SMHI sedan början av 70-talet. Modellen är begreppsmässig, d.v.s. den bygger på en förenklad fysikalisk beskrivning och kalibreras till specifika vattendrag. Den har en enkel struktur och är i grunden uppbyggd av tre huvudmoduler; en för beräkning av snöns ackumulation och avsmältning, en för beräkning av markfuktighet och en tredje rutin för beräkning av vattnets vägar och hur vattenflöden påverkas av magasinering i mark,

grundvatten och sjöar. Modellen är semidistribuerad, vilket innebär att avrinningsområdet delas in i delområden inom vilka höjder och vegetationszoner (skog, öppet landskap, glaciär och sjöar) klassificeras. Den har dessutom speciella funktioner för att separat hantera större sjöar och sjöregleringar. I projektet har HBV-modeller använts för de områden som visas i Figur 3 och Tabell 3. Modellerna är kalibrerade och har tidigare använts för beräkningarna av flöden i flödesdimensioneringsklass I.

4 Metoder för beräkning av tillrinning med återkomsttid kring 100 år

I detta kapitel beskrivs nuvarande och nya metoder för beräkning av tillrinnande flöde med statistisk återkomsttid på hundra år, HT100. De tekniker som beskrivs representerar olika principiella utgångspunkter men också teknikval för statistisk analys och varianter av hydrologisk modellering.

Skilda tekniker för att beräkna HT100 har utgångspunkt i olika former av antaganden som påverkar resultaten. De metoder som presenteras här skiljs framförallt åt genom att bedömningen av HT100 görs utifrån;

- **Tillrinning baserad på observationsdata**
Frekvensanalys av observationsdata från nuvarande reglerade flödesregim.
- **Tillrinning baserad på alternativ beräknad tillrinningsdata**
Frekvensanalys av observerad naturlig tillrinning, rekonstruerad/naturlig tillrinning eller tillrinning modellerad med standardiserad reglering av vattenmagasin.
- **Modifierad metodik för beräkning av flöde i flödesdimensionering klass I**
Modifierad beräkning av flöde i flödesdimensionering klass I, genom reducerad designnederbörd och reducerat designsnömagasin.

Frekvensanalyser av historiska tillrinningar för reglerade flödesregim utgår implicit ifrån att informationen i redan inträffade reglerade högflöden representerar systemet väl, d.v.s det sätt som tillrinningar samspelar med magasinssylnadsgrader och hur tappningar sköts historiskt är likartat och blir likartat för framtiden. De övriga metoderna avser minska betydelsen av tidigare samspel mellan reglering och höga tillrinningar, antingen genom att helt bortse från reglering eller genom en förenklad standardiserad beskrivning.

För de första två kategorierna är frekvensanalys ett viktigt verktyg för beräkningarna. Underlagsdata har ofta egenskaper som standardmässig frekvensanalys (Klemeš, 1993; Stedinger, 1993) svårtligen beskriver, t.ex tröskeffekter (Rogger m.fl, 2012b) eller högflöden som genereras av flera processer (Waylen & Woo, 1982). Icke-parametriska fördelningar såsom Kernel Density Estimation (KDE) eller mixade frekvensfördelningar är verktyg som potentiellt har de egenskaper som söks.

Tillgången på observationsdata varierar starkt inom och mellan vattendrag, medan nationellt heltäckande meteorologisk underlagsdata (Johansson, 2002) finns sedan 1960-talet, vilket gör hydrologisk modelldata ett alternativt och mer enhetligt underlag. Hydrologiska modeller används rutinmässigt för operationella tillrinningsprognoser, beräkna naturlig vattenföring utan vattenkraftsutbyggnad (s.k. rekonstruktionsberäkningar) och för att utvärdera olika reglerstrategier.

4.1 FREKVENSPANALYS AV OBSERVATIONSDATA

Standardmetoden för frekvensanalys (Klemeš, 1993) utgår ifrån att observerade flöden kommer från en och samma process och att de sinsemellan är oberoende, d.v.s. att de i statistisk mening slumpgenererats från samma okända fördelning. Generellt gäller att metodens matematiska grundantaganden är svårare att uppfylla för reglerade flödesregimer än vid naturliga förhållanden;

- flödestoppar är slumpgenererade och oberoende
- flödestoppar härstammar från samma homogena process
- observationsdata är representativt för den bakomliggande slumpprocessen

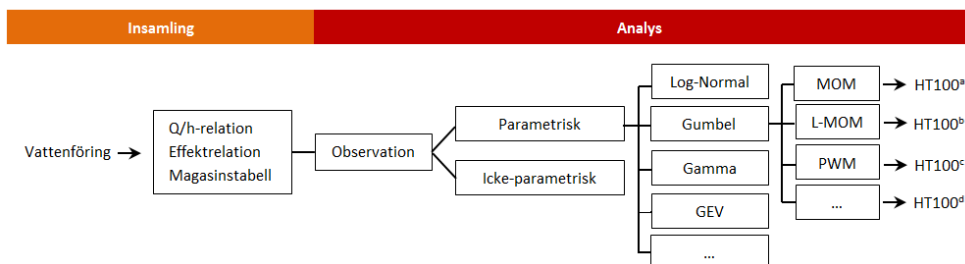
Av praktiska skäl används ofta årlig maximalvattenföring (eng. *Annual maximum*) men urval med tröskelvärde förekommer också (eng. *Partial Duration Series*). Parametrarna i kända matematiska fördelningar anpassas så att fördelningarna beskriver observationsdata optimalt, varpå någon av dessa fördelningar väljs. Valet av fördelning kan ske utifrån olika kriterier (Cunnane, 1985; Laio m.fl., 2009), och utfallet av något s.k. anpassningsmått som mäter samstämmigheten mellan data och modell är mycket vanligt liksom visuella expertbedömningar (Wilson, 2011).

Denna rapport fokuserar på utseendet och typiska egenskaper i vanligt förekommande sannolikhetsfördelningar i relation till utseende av de flödesdata som ska beskrivas. Det stora antal val som kan göras vid frekvensanalys introducerar osäkerhet (Merz och Thielen, 2005). Anpassning av frekvensfördelningar till observationsdata ger potentiellt många kandidater för HT100. Arbetsgången från vatten i vattendrag, via observation till beräkning av HT100 illustreras i Figur 4.

Teknikval såsom frekvensfördelning och parameterskattningsteknik har stor betydelse för resultatet. Litteraturen inom området är omfattande men ofta behandlas ideala förhållanden eller observationsdata med goda egenskaper för frekvensanalys. Från reglerade vattendrag är underlagsdata ofta litet och skevt fördelat.

Parameterskattning för frekvensfördelningar görs typiskt genom att använda dataunderlagets moment (medelvärde och varians) för fördelningen eller att söka de parametrar som ger fördelningen med störst sannolikhet att generera dataunderlaget, Maximum likelihood. Momentmetoden (MOM) har i och med en enkelhet varit populär och Maximum likelihood är standard i många generella programvaror. Linear moments (L-MOM) (Hosking, 1990) eller probability weighted moments (PWM) framhålls ibland för hydrologiska data (Landwehr, 1980; Stedinger, 1993; Wilson, 2011). Lindström (1993) utvärderade ett antal parameterskattningstekniker och frekvensfördelningar med slutsatsen att den enkla gumbelfördelningen med momentmetoden gav åtminstone lika bra resultat som andra vanligt förekommande frekvensfördelningar och parameterskattningsmetoder. Mot denna bakgrund används i denna rapport gumbelfördelning och momentmetoden (MOM) för parameterskattning som referens. Som mått på överensstämmelsen mellan den anpassade

frekvensfördelningen och observationsdata används Kolmogorov-Smirnov-test.

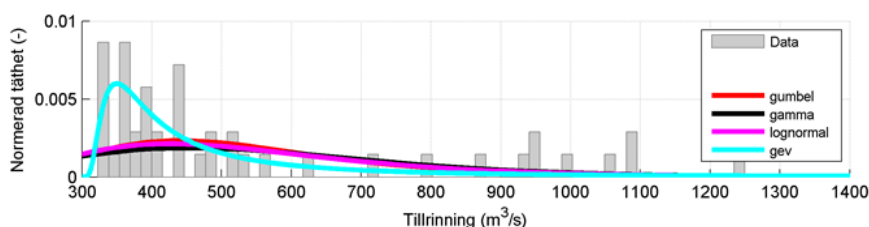


Figur 4. Databehandling för beräkning av HT100.

I ett naturligt vattendrag uppträder årsmax av vattenföringen till följd av hydrologiska händelser såsom nederbörd, snösmältning eller en kombination av dessa. Eftersom det årligen är samma processer som genererar de höga flöden finns en länk mellan vanligt förekommande högflöden och extremer. I sådana situationer är ofta bakomliggande antaganden för frekvensanalys uppfyllda och enkla frekvensfördelningar fungerar bra som verktyg. För situationer när flöden genereras av olika processer eller om regleringar ger dataset som har tröskeffekter eller multimodalitet behövs frekvensfördelningar som har flexibilitet för att återge detta.

4.1.1 Enkla frekvensfördelningar

Frekvensanalys med enkla fördelningar är väldokumenterad (Stedinger, 1993; Coles 2001). Det finns flera familjer av fördelningar såsom GEV-, Normal- och Pearsonfamiljen som styrs av olika antal parameterar och har olika extrapolationsegenskaper. Fördelarna med dessa är att de vilar på erkända matematiska principer samt enkelheten. Nackdelar är att de bakomliggande matematiska grundantagandena inte alltid kan anses uppfyllda vilket t.ex. kan ta sig uttryck genom att anpassningen till observationsdata blir dålig. Enkla frekvensfördelningar har i sitt densitetsspektrum från maxvärdet strikt avtagande sannolikhet. I Tabell 4 redovisas vanligt förekommande enkla frekvensfördelningar och parameterskattningsmetoder för frekvensanalys. Anpassning av enkla frekvensfördelningar till tillrinningsdata visas i Figur 5.



Figur 5. Exempel på enkla frekvensfördelningar anpassade till observationsdata.

I Lindströms studie (Lindström, 1993) utvärderades frekvensfördelningar och parameterskattningsmetoder samt lokal resp. regional frekvensanalys. Ingen metod framhölls som "bäst" då olika metoder presterade väl sett till olika

utvärderingskriterium. Det konstaterades dock att lokala metoder presterade bättre än regionala.

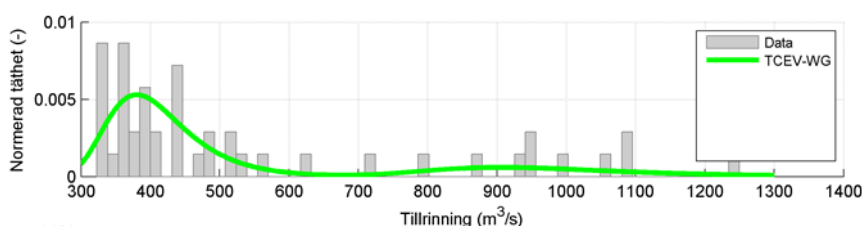
Tabell 4. Vanliga metoder vid frekvensanalys av hydrologiska data. Kursiv stil indikerar exempel i denna rapport.

Sannolikhetsfördelning	Parameterskattning
<i>GEV</i>	<i>Maximum likelihood estimation (MLE)</i>
<i>Gamma</i>	<i>Method of momenta (MOM)</i>
Generaliserad Pareto	Partial weighted moments (PWM)
<i>Gumbel (EV I)</i>	Linear Moments (L-moments)
Logistic	CRPS
Log-logistic	
<i>Log-normal</i>	
Log-Pearson (LP3)	
Potensfördelning	
Weibull (EV III)	

4.1.2 Mixade frekvensfördelningar

Mixade frekvensfördelningar är en liten men växande nisch med tillämpningar inom högflödesanalys (Singh & Sinclair, 1978; Beran m.fl., 1986; Connell & Pearson, 2001; Fiorentino m.fl., 1985; Rossi, 1984; Waylen & Woo, 1982). Rent praktiskt används en kombination av två eller flera frekvensfördelningar som optimeras för olika delar av flödesspektrumet. Metoden kan beskriva observationsdata som har kluster i specifika flödesregister, vilket är vanligt i exempelvis flödesserier från reglerade vattendrag eller för att separera olika genererande processer.

Internationellt sett har metoden framförallt tillämpats i Italien (Rossi, 1984), då under namnet TCEV, (eng. *Two Component Extreme Value distribution*). I föreliggande rapport har två gumbelfördelningar kombinerats och benämns TCEV-WG, för att indikera att de viktats samman. Gumbelfördelningen har valts för dess goda egenskaper och fåtal parametrar. Till skillnad gentemot övriga studier skattas inte två olika processer var för sig, utan den sammansatta fördelningen optimeras mot observationsdata. För fallet med två gumbelfördelningar bestäms två parametrar (α , β) för vardera fördelningen, samt den relativa vikten (w) mellan fördelning 1 och 2, vilket ger totalt 5 parameterar. Flertalet olika paramterskattningsmetoder har undersökts, se Tabell 5. Anpassning av mixad fördelning (TCEV-WG) till tillrinningsdata visas i Figur 6.



Figur 6. Exempel på mixad frekvensfördelning anpassad till observationsdata.

Tabell 5. Parameterskattningsmetoder för mixad fördelning

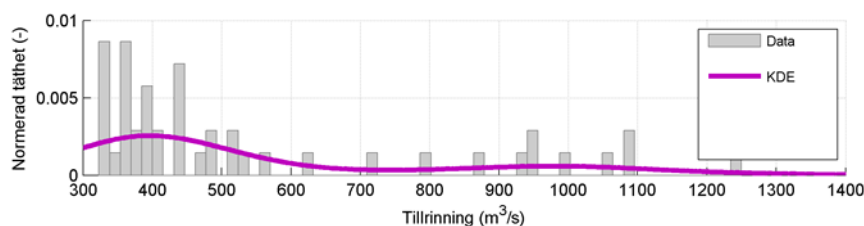
Parameterskattningsmetod	Beskrivning
Systematisk	Korsvis kombinerad av parametervärden. Parameterintervall för den kombination som ger bäst anpassning*.
Monte Carlo	Stokastisk metod för generering av parametervärden. Parameterintervall för den kombination som ger bäst anpassning*.
Optimerad sökning	Med utgångspunkt i en startgissning av parametervärden sker successiv modifiering av dessa parametervärden så länge som bättre anpassning *erhålls.
Simulated annealing	Stokastisk metod med successivt urval mot bättre anpassning*.

*Anpassningsmått är logLikelihood

4.1.3 Icke-parametrisk frekvensfördelning

Observationsdata kan användas direkt för att skapa en empirisk sannolikhetsfördelning, speciellt som underlaget är stort. Fördelarna med en icke-parametrisk metod är framförallt den goda följsamheten till data inom observationsmängden, eftersom fördelningen helt baseras på dessa. Nackdelar är tveksamma extrapolationsegenskaper samt den stora känsligheten för förändringar eller osäkerheter i data.

En variant av icke-parametrisk sannolikhetsfördelning är s.k. *Kernel Density Estimation* (KDE) som baseras summering av lokala fördelningar vid varje observation. KDE har egenskaper som minskar betydelsen av enskilda observationer jämfört med en empirisk fördelning helt baserad på observationer. En fördelning av denna typ kan följa mycket komplicerade flödesspektrum och har goda egenskaper inom spännvidden för observationsdata. Extrapolationsegenskaperna kan däremot förväntas mindre goda. Anpassning av KDE till tillrinningsdata visas i Figur 7.



Figur 7. Exempel på sannolikhetsfunktion med KDE.

4.2 FREKVENSPANALYS AV ALTERNATIV FLÖDESDATA

Genom att analysera en alternativ flödesregim kan högflödespotentialen för en plats åskådliggöras helt utan eller under standardiserad inverkan av vattenreglering.

4.2.1 Naturlig flödesregim

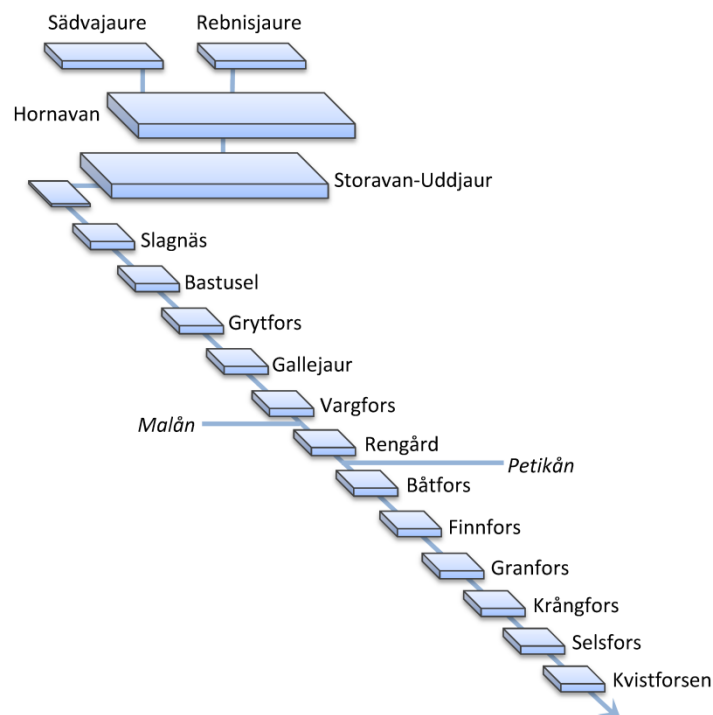
Observationsdata och rekonstruerad naturlig vattenföring från mätstationer i reglerade vattendrag, enligt Figur 2 jämförs. Högflödeskaraktärstiken för naturliga och reglerade förhållanden illustreras för Gäddede, Bergnäs, Kilforsen samt

Volgsjöfors. Regleringsgraden är för Gäddede ca 70 % och för övriga anläggningar ca 40 %.

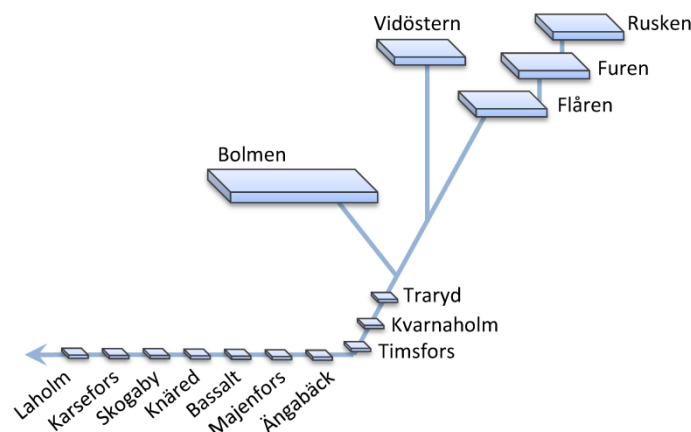
4.2.2 Standardiserad reglering

I en hydrologisk modell med standardiserade regleringsrutiner för vattenmagasin simuleras tillrinning under en längre historisk period, vilken analyseras med frekvensanalys. Målet är att beskriva höglödespotentialen i historiska väderhändelser under rimlig och likartad reglering. De standardiserade regleringarna beskriver de framträdande dragen för säsongsplaneringen. Detta innebär ansättning av normala magasin nivåer inför vårflod och beskrivning av strategier för normalproduktion och spilltappning. Den standardiserade regleringen avser inte att beskriva reglering på kort tidsskala såsom exempelvis dämpning av enskilda flödestoppar, eftersom detta ofta sker på andra grunder än rent hydrologiska.

Skellefteälven och Lagan har studerats, se Figur 8 och Figur 9. Skellefteälven karaktäriseras av stora årsmagasin (Sädvajaure, Rebnisjaure, Hornavan, Storavan-Uddjaur) samt stora oreglerad tillflöden (Malån och Petikån) nedströms Vargfors. Lagan karaktäriseras av några större reglerade sjöar (Bolmen, Vidöstern, Furen och Rusken) samt endast mindre magasin nedströms dessa.



Figur 8. Schematisk skiss över Skellefteälven.



Figur 9. Schematisk skiss över Lagan.

Modelluppsättningen är samma som används för beräkning av flöden i flödesdimensioneringsklass I för respektive vattendrag. För HT100-beräkningen genomförs en kontinuerlig simulering med historisk temperatur och nederbörd till skillnad mot klass I-beräkningen som sker iterativt och med större nederbörd och snömagasin.

För att simulera säsongsvis men inte situationsspecifik reglering används standardiserade och schematiska antaganden om magasinshantering. Rimligheten i antagen magasinshantering kontrolleras mot observationer av magasinering och tappning i resp. vattendrag. Följande principer har använts för reglering;

- **Strategier för magasinsfyllnad**
Samma uppfyllnadsstrategier som vid beräkning av flöden i flödesdimensioneringsklass I
- **Normala magasin nivåer inför vårflood**
Magasinsnivåer ansätts när snömagasinet kulminerar. Medelvärde för vattenståndet vid snömaximum de senaste 30 åren har använts.
- **Säsongsmagasin tappar tillrinning from 1:a augusti**
Tappning minst historiskt månadsmedel
- **Icke-säsongsmagasin tappar tillrinning under hela året**
Tappning minst historiskt månadsmedel

I tillägg beskrivs också andra betydande förutsättningar för reglering såsom exempelvis maxtappningar eller aktiv flödesdämpning. I Lagan är magasinet Bolmen ett sådant exempel. Lokal praxis innebär att anläggningen tappar maximalt 80 m³/s för vattennivåer upp till överkant av dammens tätkärna.

4.3 MODIFIERAD METODIK FÖR FLÖDESDIMENSIONERING KLAS I

Metoden som används för beräkning av flöden för dammar i flödesdimensioneringsklass I (Svensk energi, 2015) har modifierats för att generera lägre flöden. Syftet är att kartlägga kombinationer av snömagasin och extrem nederbörd som ger flöden i samma storleksordning som statistiskt beräknade

HT100 baserat på observationsdata. Metoden kan tillämpas även för platser med korta serier av observerad vattenföring eftersom nationellt täckande meteorologisk drivdata finns tillgänglig för lång tid. Andra utmärkande egenskaper är att belastningen i form av nederbörd och snö är normerad samt regleringsrutiner kan beskrivas. Det senare är intressant i vattendrag där magasin aktivt används för att dämpa flöden. Effekten av detta finns mycket sällan eller inte alls i observationsdata då dessa händelser är ovanliga.

Dammanläggningarna Parki, Slagnäs, Båtfors, Pengfors, Torpshammar, Trängslet, Ängabäck och Värmeshult har använts som demonstrationsfall. Dimensionerande snömagasin har ansatts till återkomsttiden 30-2 år samtidigt som dimensionerande nederbördssekvens har reducerats med 0 - 70 % och korskombinationer utvärderats.

5 Erfarenheter från beräkning av tillrinning med återkomsttid kring 100 år

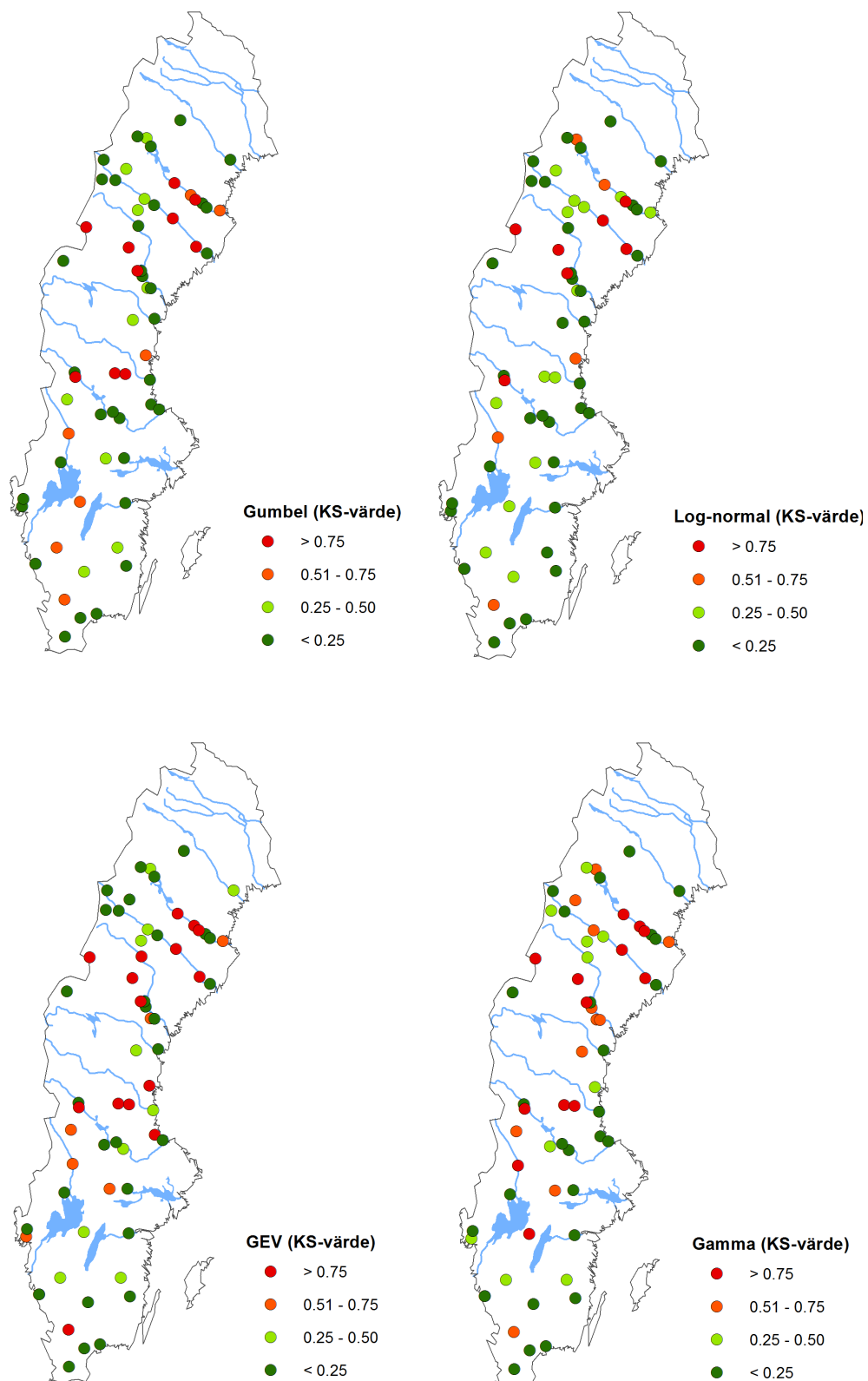
I det följande redovisas resultaten från utvärdering av metoder för bestämning av HT100. Resultaten pekar på att det i många fall går att använda enkla frekvensfördelningar samtidigt som en mixad frekvensfördelning i de flesta fall ger bättre anpassning till data. Simulering med standardiserade regleringsrutiner ger ett enhetligt material och lyfter fram högflödespotentialen under perioder med hög fyllnadsgrad. Slutligen visas exempel där en modifierad klass I-metodik ger flöden i storleksordningen HT100.

Inledningsvis visas resultaten för frekvensanalys av observationsdata för enkla resp. mixade frekvensfördelningar. Utvärderingen sker enligt Kolmogorov-Smirnov test samt visuell granskning i frekvensdiagram för att diskutera principiella egenskaper i såväl data som för statistiska fördelningar och parameterskattningsmetoder. Analys av naturlig vattenföring och hydrologisk simulering av tillrinning tillför information som traditionellt sett inte används för beräkning av HT100 vilket exemplifieras för Skellefteälven och Lagan.

5.1 FREKVENSPANALYS AV OBSERVATIONSDATA

5.1.1 Enkla frekvensfördelningar

Frekvensanalys har utförts för ett urval av 62 st tillrinningsserier vilka representerar vanligt förekommande flödesregimer, från naturlig tillrinning för randmagasin till kraftigt reglerade förhållanden. Anpassningstest kan mäta hur bra en statistisk modell beskriver observationsdata. Resultat med Kolmogorov-Smirnov(KS) test visas i Figur 10. För mycket god anpassning mellan vald fördelning och observationsdata är KS-testet nära noll. KS-värde 0,8 för test mot Gumbel betyder att det är 80 % sannolikhet att data inte kommer från en gumbelfördelning. I Figur 10 visas att anpassningen mellan enkla frekvensfördelningar och observationsdata i regel är bättre för platser där inverkan av reglering är låg, vilket visas med gröna punkter. Typiskt är detta randmagasin eller anläggningar vattendragens mynnningar. För anläggningar som har flera årsregleringsmagasin uppströms är anpassningen generellt sämre, vilket indikeras med orange och röda punkter.

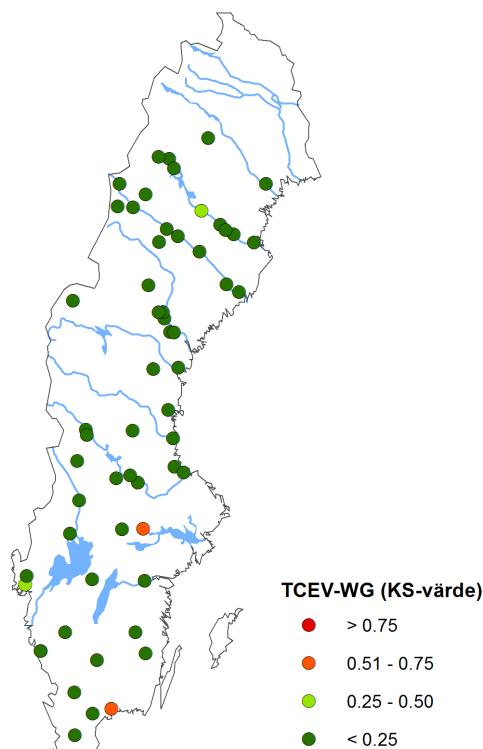


Figur 10. Anpassning till observationsdata (Kolmogorov-Smirnov) för Gumbel-, Log-normal-, GEV- och Gammafördelning

5.1.2 Mixade frekvensfördelningar

Frekvensanalys med den mixade frekvensfördelningen TCEV-WG har utförts för samma urval av flödesserier i avsnitt 5.1.1. Eftersom parameterskattning för mixade fördelningar inte är beskrivet i litteraturen i samma omfattning som för enkla fördelningar har flera olika metoder undersökts enligt Tabell 5. Den gradientbaserade optimeringen är s.k. *fminsearch* i programvaran Matlab®. Den metoden presterar generellt bättre än de andra metoderna men Sobolpunkter är nästan lika effektivt.

Resultat från Kolmogorov-Smirnov(KS) test som mäter hur bra den statistiska modellen beskriver observationsdata visas i Figur 11.

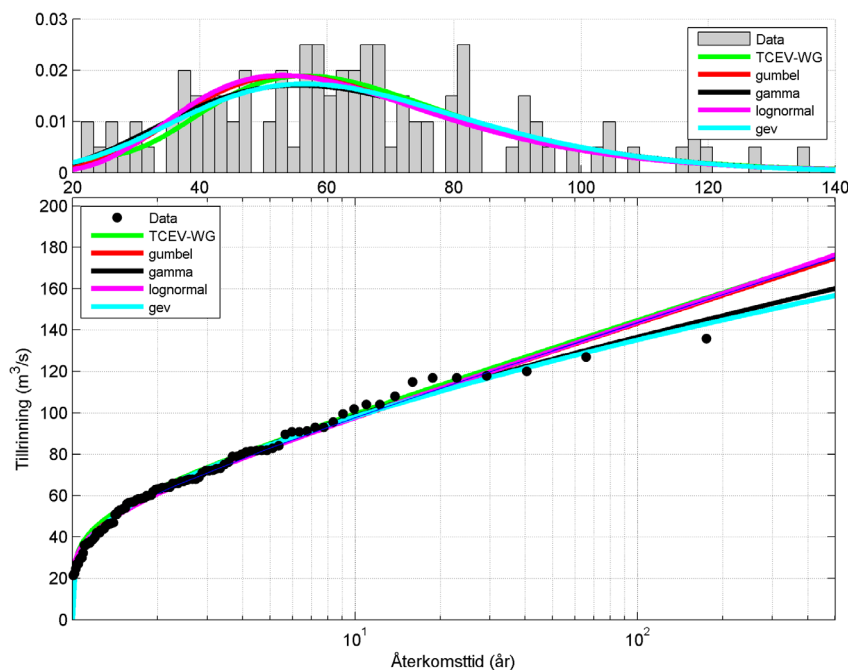


Figur 11. Anpassningsmått (Kolmogorov-Smirnov test) för TCEV-WG.

5.1.3 Jämförelser av frekvensfördelningar

Frekvensfördelningars utseende, anpassning till observationer och beräkning av HT100 visas i detta avsnitt. I Figur 12-Figur 15 visas frekvensdiagram för tillrinningsserier från olika flödesregimer som illustrerar intressanta egenskaper i observationsdata. Serien från Mörrum representerar serier där traditionella enkla frekvensfördelningar kan förväntas prestera bra. Serierna från Gäddede och Ängabäck är exempel på mer komplexa högflödesmönster som är vanligt i reglerade vattendrag där enkla frekvensfördelningar inte lika väl representerar data och en mixad fördelning kan vara ett alternativ.

I Mörrum (Figur 12) uppstår högflöden av naturliga drivkrafter, i huvudsak nederbörd, och observerade flöden ökar med minskande frekvens. Data följer en jämn fördelning som flertalet frekvensfunktioner kan anpassas till.



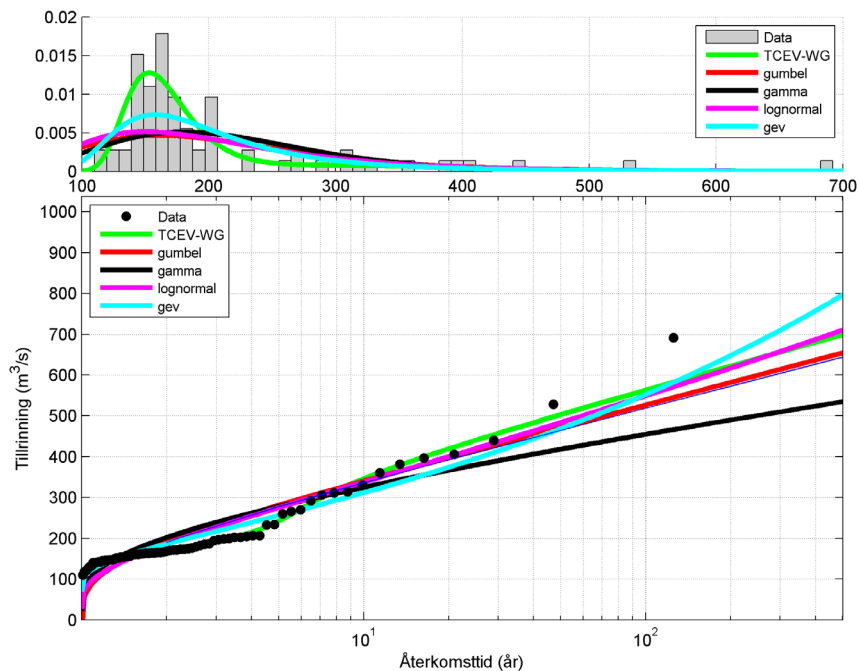
Figur 12. Jämförelse av frekvensfördelningar för Mörrum i Mörrumsån. Frekvensfördelningarna är färgkodade enligt Gumbel (röd), TCEV-WG (grön), Gamma (svart), GEV (magenta).

För Gäddede är tillrinningen kraftigt reglerad och högflödesdata är styrd mot utbyggnadsvattenföringen 175 m³/s. Samtliga enkla frekvensfördelningar har svårigheter att representera data i det låga och höga tillrinningsregistret. Den mixade fördelningen TCEV-WG har möjlighet att separera beskrivningen i lågt respektive högt flödesregister och ger en karaktäristiskt annorlunda frekvenskurva. GEV fördelningen överanpassas ibland i det låga registret och får därmed en brant frekvenskurva speciellt för längre återkomsttider, se Figur 13. Detta beteende avspeglas inte i olika statistiska mått såsom KS-testet men är mycket vanligt när data innehåller många relativt låga värden.

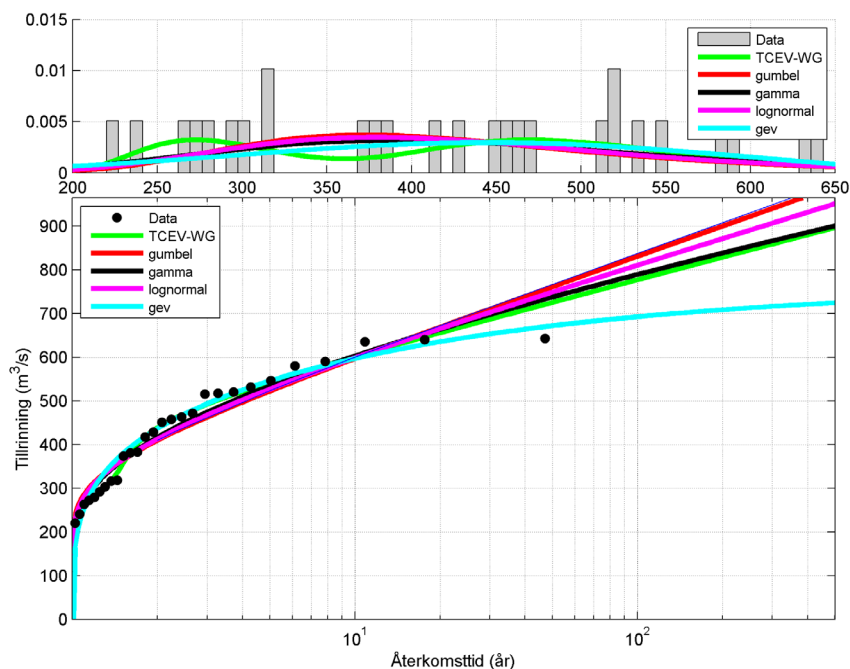
För Kvistfors i nedre delen av Skellefteälven har oreglerad tillrinning via Malån och Petikån stor betydelse för de högsta uppmätta tillrinningarna. Spridningen mellan olika frekvensfördelningar är stor, se Figur 14. Utbyggnadsvattenföring är 300 m³/s.

Högflöden vid Ängabäck (Figur 15) i Lagan påverkas också av uppströms reglering och styrs mot utbyggnadsvattenföringen 120 m³/s. Det saknas i princip observationer i ett flödesregister strax över utbyggnadsvattenföringen vilket medför problem med anpassningen för samtliga enkla frekvensfördelningar. Den mixade fördelningen TCEV-WG har möjlighet att representera denna effekt och ger en karaktäristiskt annorlunda frekvenskurva. Det är illustrativt att både TCEV-

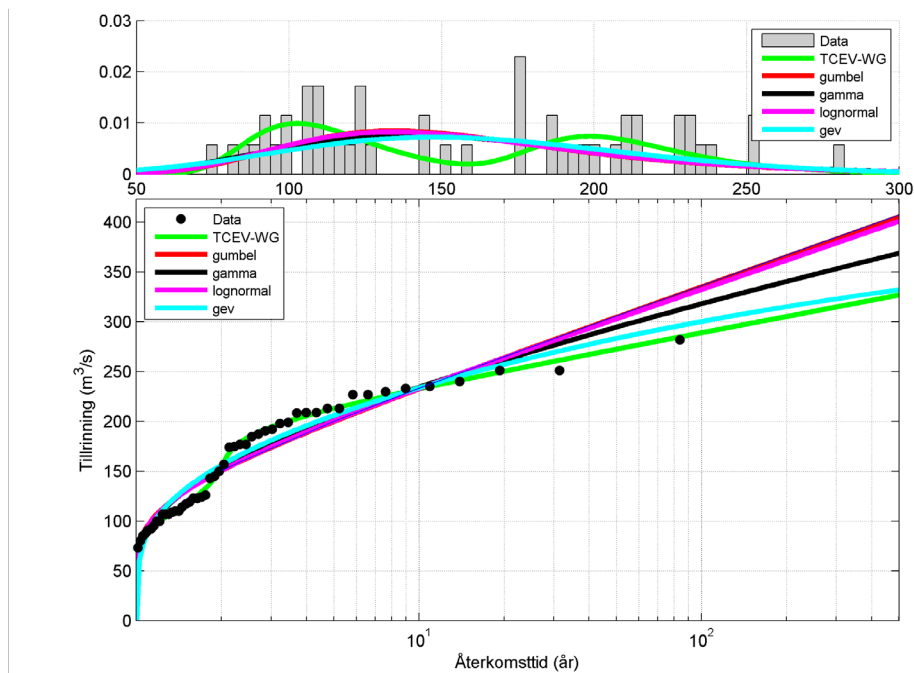
WG och GEV har likartade frekvenskurvor (nedre diagram) även om anpassningen till flödesdata är helt olika (övre diagram).



Figur 13. Jämförelse av frekvensfördelningar för Gäddede i Ångermanälven. Frekvensfördelningarna är färgkodade enligt Gumbel (röd), TCEV-WG (grön), Gamma (svart), GEV (magenta).

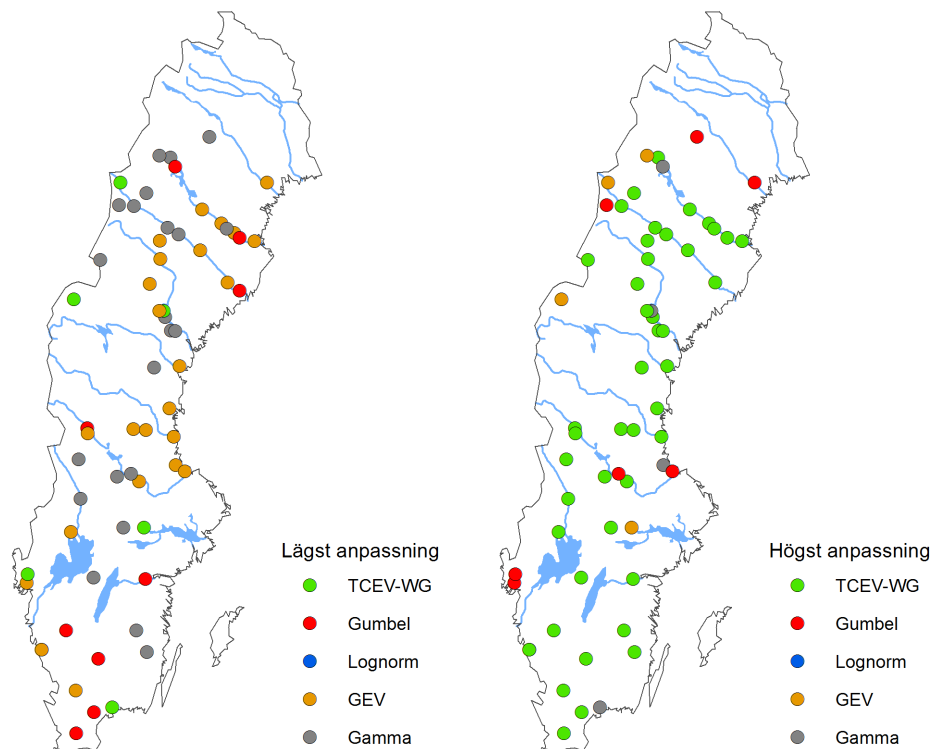


Figur 14. Jämförelse av frekvensfördelningar för Kvistfors i Skellefteälven. Frekvensfördelningarna är färgkodade enligt Gumbel (röd), TCEV-WG (grön), Gamma (svart), GEV (magenta).



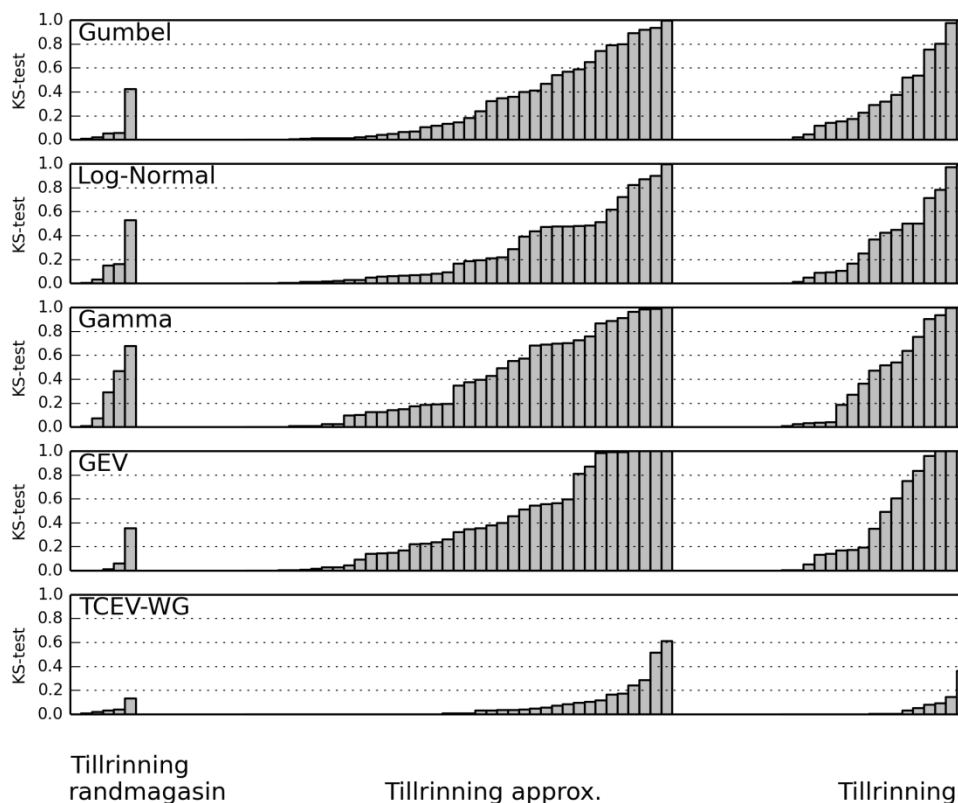
Figur 15. Jämförelse av frekvensfördelningar för Ångabäck i Lagan. Frekvensfördelningarna är färgkodade enligt Gumbel (röd), TCEV-WG (grön), Gamma (svart).

I Figur 16 och Figur 17 presenteras utvärdering av frekvensanalyser med Kolmogorov-Smirnov test (KS-test) som mäter överensstämmelse mellan observationsdata och den anpassade frekvensfunktionen. För varje punkt presenteras frekvensfunktionen med högst respektive lägst anpassnings till observationsdata.



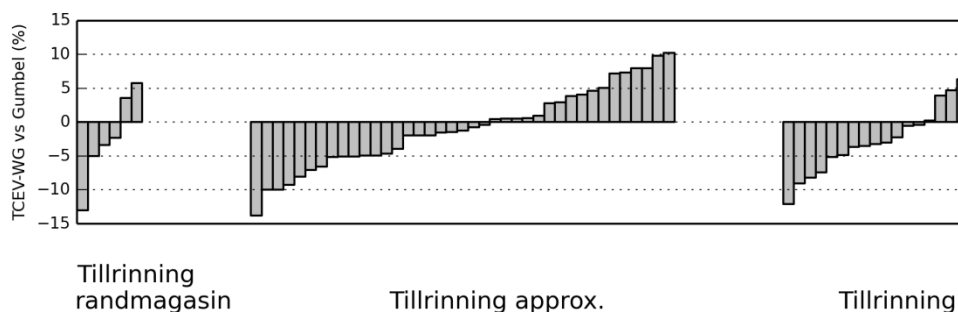
Figur 16. Lägst (vänster) resp. högst (höger) anpassning mellan frekvensfördelning och observationsdata enligt Kolmogorov-Smirnov test.

Observationsdata är kategoriserat enligt Figur 2. Jämfört med enkla frekvensfördelningar ger den mixade frekvensfördelning TCEV-WG oftast högre anpassning till observationsdata, Figur 17. Staplarna i den undre grafen (TCEV-WG) är generellt lägre än för övriga (Gumbel, Lognormal, Gamma, GEV). Det kan dock noteras att KS-testet mäter avvikelse över hela frekvensfunktionen och inte specifikt i fördelningen svans.



Figur 17. Frekvensfunktioners anpassning till observationsdata för olika kategorier av tidsserier.

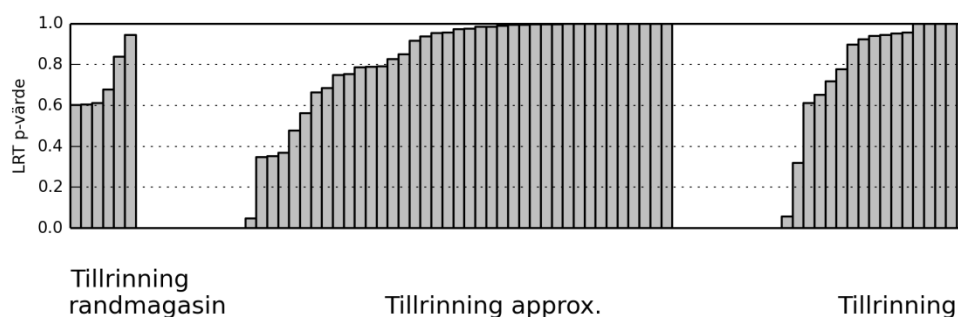
HT100 beräknat med Gumbelfördelning resp. mixade fördelning TCEV-WG jämförs i Figur 18 och skillnaden uttrycks procentuellt. För alla kategorier förekommer det att beräkningen med TCEV-WG kan ge såväl lägre som högre beräknat HT100, spannet är i storleksordningen -15 % till +10%. Det sker inte en generell skiftning till högre eller lägre beräknat HT100 utan skillnaden är platsspecifik. För flertalet platser är dock HT100 beräknat med TCEV-WG (MLE) lägre än för Gumbel (MOM).



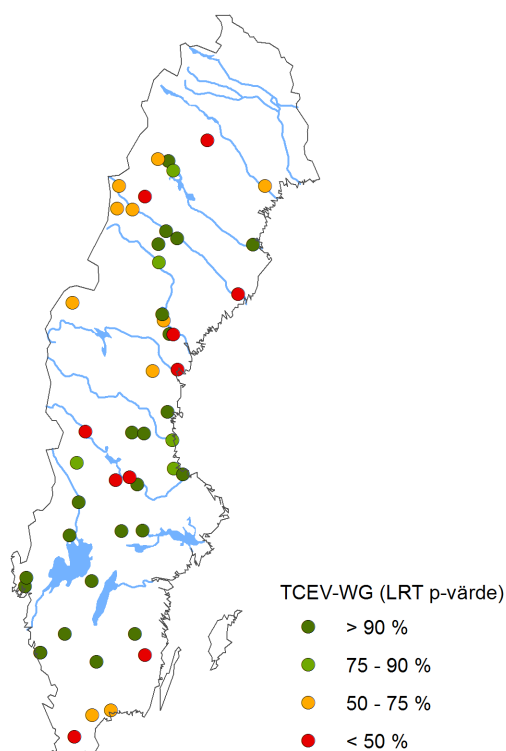
Figur 18. Jämförelse av storlek på HT100 beräknat med TCEV-WG(MLE) resp. Gumbelfördelning(MOM).

Eftersom en Gumbelfördelning är ett specialfall av TCEV-WG är det möjligt att statistiskt testa om det är den eventuella förbättringen i anpassning med TCEV-

WG motiverar denna mer komplicerade fördelning med fler parametrar. I Figur 19 presenteras konfidensvärdet (p-värde) för likelihood ratio test som mäter detta. Testet visar med vilken säkerhet en mer komplicerad modell (TCEV-WG) är bättre än en enkel modell (Gumbel) med hänsyn taget till att TCEV har flera fria parametrar. Testvärden ligger i intervallet 0-1 där värden nära 1 indikerar att det är en säker förbättring. Exempelvis innebär p-värdet 0.80 att det med 80 % säkerhet är bättre att använda TCEV-WG än Gumbel. Signifikansnivå 0.95 är en vedertagen nivå inom statistisk analys. För serier med tillrinning till randmagasin är förbättringen oftast liten, vilket kan förklaras med att dessa oreglerade serier ofta beskrivs relativt väl av klassiska enkla frekvensfördelningar. För tillrinningsserier som inte är randmagasin syns i många fall en förbättring. Av totalt 56 serier beskrivs 23 st med 95 % säkerhet bättre med TCEV-WG än en gumbelfördelning.



Figur 19. Likelihood ratio test för utvärdering om TCEV-WG är signifikant bättre än Gumbelfördelning i olika kategorier.



Figur 20. Likelihood ratio test för utvärdering om TCEV-WG är signifikant bättre än Gumbelfördelning.

5.2 FREKVENSPANALYS AV ALTERNATIV FLÖDESDATA

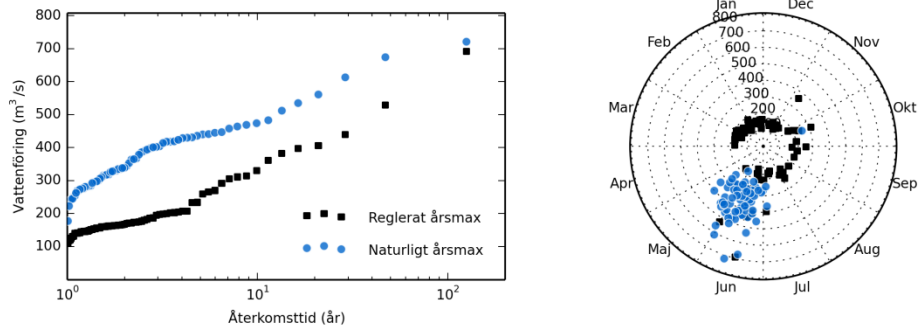
5.2.1 Naturlig flödesregim

Jämförelser av högflödeskaraktäristik i vattendrag före resp. efter utbyggnad är intressant och ger ökad förståelse för hur vattenreglering påverkar förekomsten och storleken av höga flöden. I norra Sverige sker årsreglering i allmänhet genom att magasinera vatten från snösmältning, vilket resulterar i att högflöden under vårfloden dämpas, även om flödesdämpning inte är regleringens uttalade syfte. Observationsdata från en anläggning ger god indikation om processer som genererar högflöden under den reglerade flödesregimen, vilka kan vara mycket olika från det som sker under naturliga förhållanden.

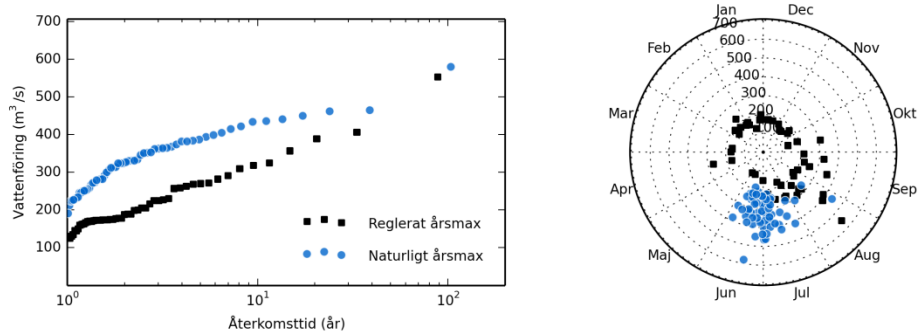
Observerad reglerad vattenföring presenteras tillsammans med observerad naturlig vattenföring (innan reglering) och/eller rekonstruerad vattenföring med empirisk återkomsttid i Figur 21-Figur 24. Distributionen av de årligt högsta vattenföringarna ligger generellt lägre för den reglerade flödesregimen än för den naturliga/rekonstruerade, men distributionerna har olika form. Det ska poängteras att det är olika situationer och processer som orsakat de årligt högsta flödena, vilket framgår av punkterna i årstidsdiagrammen. För de naturliga flödesregimerna är det händelser som domineras av snösmältning under våren. För de reglerade regimerna kan noteras att flertalet av de största flödena inträffat under hösten, troligtvis vid kraftiga regn.

Båda typerna av distributioner indikerar att det kan finnas tröskeffekter (Rogger m.fl., 2012b) men det är mer accentuerat i de reglerade serierna som sällan har en jämn form som enkelt kan beskrivas med en parametrisk frekvensfördelning. Flertalet år är det högsta värdet i reglerad regim helt kontrollerat, d.v.s. i princip frikopplat från hydrologiska drivkrafter och svårigen ett högflöde i egentlig mening. Exempelvis har årshögsta flödet inträffat under december-mars i Gäddede (Figur 21) och Bergnäs (Figur 22) vilket inte förekommer naturligt. Enstaka år med kraftiga tillflöden under hösten uppträder årsmax till följd av hydrologiska mer eller mindre extrema situationer, exempelvis för Kilforsen (Figur 24). I Volgsjöfors och Kilforsen inträffar en dämpad vårflod i maj-jun även under regleringen, men enstaka år inträffar årsmax under hösten vilket i princip inte förekom före regleringen.

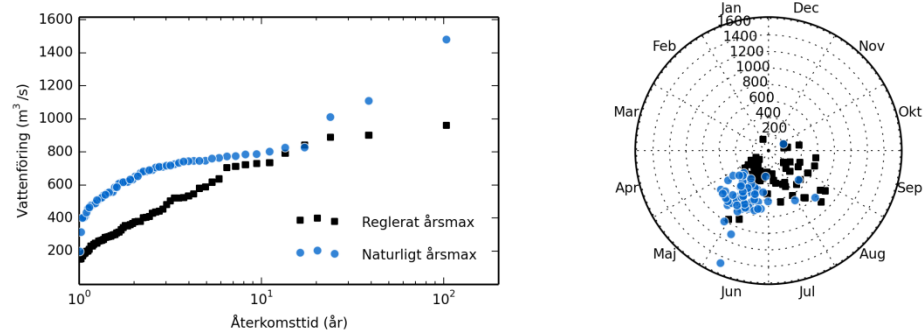
Resultaten är likartade som erhöles av Sundby och Lindström (1996) som undersökte Luleälven i (Boden, Akkats), Umeälven vid Umeå, Ångermanälven (Sollefteå) samt Indalälven (Hammarforsen). Fördelningarnas utseende i Figur 21-Figur 24 har analogi i exempel från Norge (Wilson, 2011), Kanada (Waylen & Woo, 1982) och Storbritannien (Lu, 2013) som visar på skillnader mellan fördelningar där snösmältning resp. regn är det drivande processen för höga flöden.



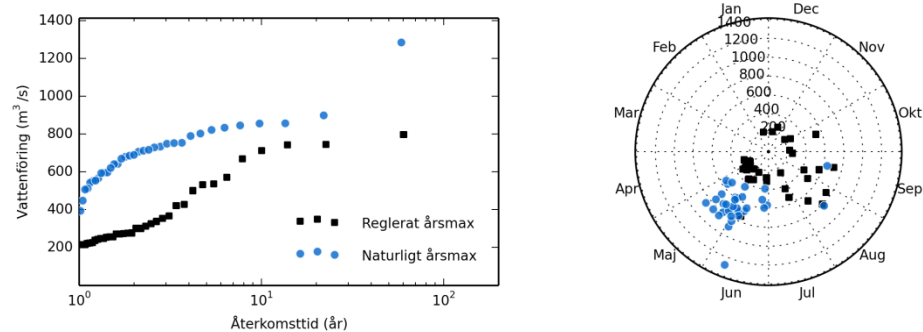
Figur 21. Återkomsttid för naturlig/rekonstruerad vattenförling (blå) och reglerad vattenförling (svart) för Gädde i Ångermanälven (vänster). Tidpunkt för varje års högsta vattenförling (höger).



Figur 22. Återkomsttid för naturlig/rekonstruerad vattenförling (blå) och reglerad vattenförling (svart) för Bergnäs i Skellefteälven (vänster). Tidpunkt för varje års högsta vattenförling (höger).



Figur 23. Återkomsttid för naturlig/rekonstruerad vattenförling (blå) och reglerad vattenförling (svart) för Volgsjöfors i Ångermanälven (vänster). Tidpunkt för varje års högsta vattenförling (höger).



Figur 24. Återkomsttid för naturlig/rekonstruerad vattenförling (blå) och reglerad vattenförling (svart) för Kilforsen i Ångermanälven (vänster). Tidpunkt för varje års högsta vattenförling (höger).

De naturliga distributionerna har grafiskt en jämn form vilket ger goda förutsättningar för standardmässig frekvensanalys. För de reglerade distributionerna syns tröskeleffekter ofta i intervallet 1-10 års återkomsttid. I Figur 21- Figur 24 visas inte anpassningar av frekvensfunktioner för att frågor kring val och anpassningen av sådana inte ska överskugga tolkningen av reglerad resp. naturlig flödesregim.

Vid beräkning av dimensionerande flöde kan det förefalla konservativt att använda data från tiden före utbyggnad eller rekonstruerade naturliga förhållanden, men det är inte ett självklart utfall. Det är också viktigt att se till de processer som genererar högflöden i den reglerade regimen. Nedströms magasin med hög regleringsgrad d.v.s för vårflöden dämpas kraftigt förefaller det underligt att grunda dimensionering på en process som tappat i betydelse efter utbyggnad. Om det erfarenhetsmässigt i reglerade vattendrag är höstflöden som orsakat mycket höga flöden är det rimligt att även dimensioneringsmetoden representerar de processerna och de förhållandena.

5.2.2 Standardiserad reglering

Skellefteälven och Lagan har satts upp med HBV-modellen och ingående magasin styrts enligt standardiserade regleringrutiner. Resultaten visar på hydrologisk modellering som ett intressant verktyg för att erhålla tidsserier reglerad vattenföring. Simuleringsmetoden garanterar långa serier och årsmaximum från en hydrologiskt driven vår- eller höst tillrinning, vilket ger en storleksspridning även för flöden med kort återkomsttid. Enligt analysen beskrivs modellerad tillrinningsdata tillfredställande med klassiska enkla frekvensfördelningar.

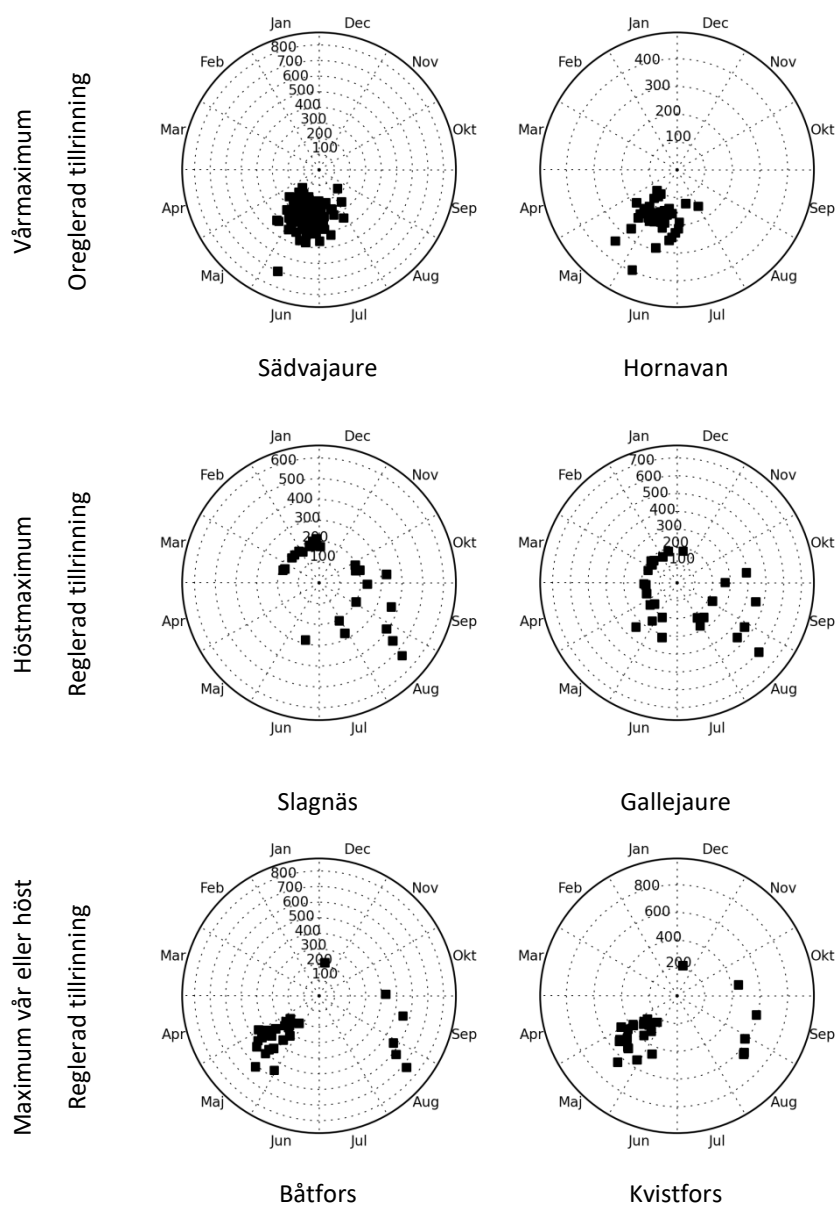
Simulerad tillrinning är konsistent längs vattendraget, vilket ger ett jämförbart material för beräkningen av hundraårstillrinning i alla punkter. Alla simulerade dataserier har samma längd, i denna analys åtminstone 50 år. Vidare är modellerade dataserier sammanlänkade, medan observationsdata i samma vattendrag är fristående och kan innehålla enstaka och systematiska fel.

Resultaten visar att högflödessituationer kan förstärkas något i simuleringarna, framförallt för flöden upp till ca 10 års återkomsttid. Jämfört med observationsdata finns en tydlig koppling mellan flödestorlek och hydrologiska drivkrafter även i detta register av måttligt höga flöden samt att de har en mer uttalad spridning i storlek. För de största uppmätta och modellerade flödessituationerna är skillnaderna däremot mindre.

Skellefteälven

Skellefteälven har simulerats med standardiserad reglering under perioden 1963-2013 vilket jämförs med historiska data från 1986, då Sädvajaure byggts om. Figur 25 visar hur årliga flödesmaximum fördelar sig över året och storleksmässigt och tre flödesregimer kan urskiljas. Anläggningar starkt påverkade av årsreglering, anläggningar delvis påverkade samt randmagasin helt utan uppströms reglering. Anläggningarnas läge i älven relativt övriga magasin och oreglerade inflöden ses i Figur 8. Tillrinning till randmagasinen är oreglerad och kan behandlas med standardmässig enkel frekvensanalys. För anläggningarna Slagsnäs, Bastusel, Grytfors, Gallejaur och Vargfors nedströms årstidsmagasinen (Sädvajaure,

Rebnisjaure, Hornavan, Storavan-Uddjaur) inträffar högflöden främst under hösten. Det är således relevant att undersöka potentialen i just höstflöden. För några av årsmagasinen och nedströms inflödet av Malån inträffar högflöden under såväl vår som höst.

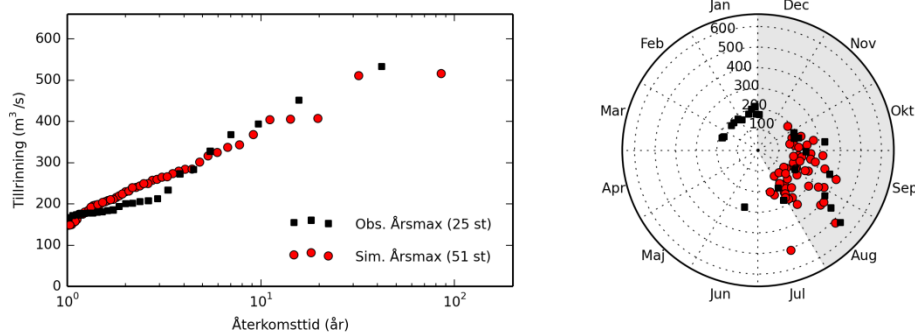


Figur 25. Tidpunkt och storlek för observerade höga tillrinningar i Skellefteälven.

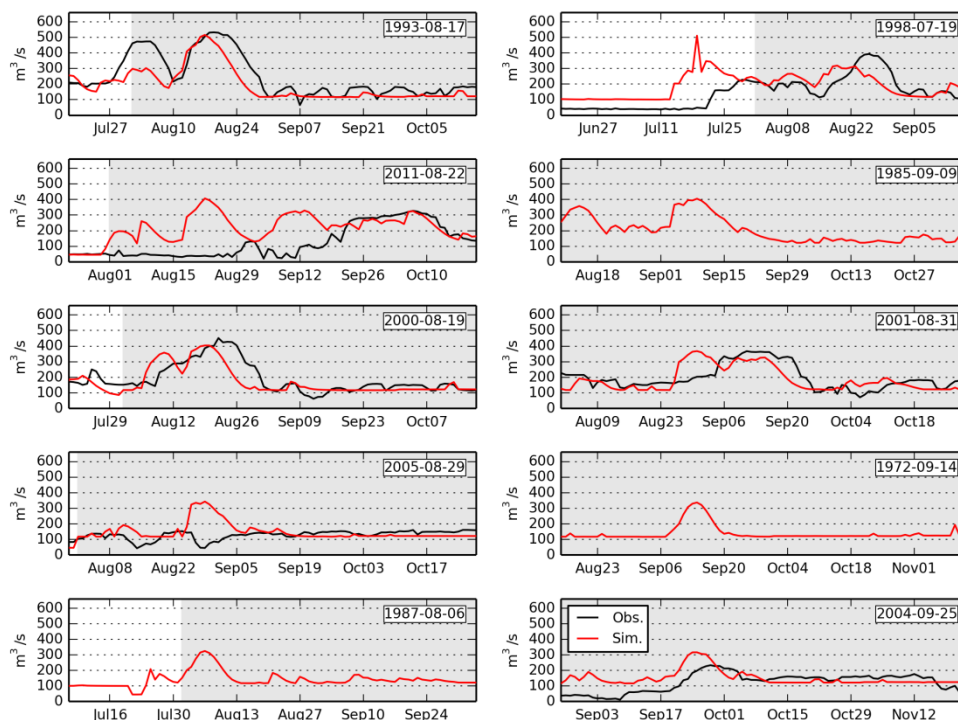
För anläggningar där högflöden i reglerad regim inträffar efter vårfloden är det relevant att undersöka högflödeshändelser under antaganden om försumbar magasinering, vilket motsvarar att historiska nederbördshändelser sammanfallit med fulla magasin.

I Figur 26 och Figur 27 visas observerad tillrinning tillsammans med simulering för Slagnäs. Från observationerna framgår att vårfloden dämpas mycket effektivt i

uppströms magasin och att höga tillrinningar framförallt har inträffat till följd av regnhändelser juli-oktober. De höga tillrinningar som inträffat under december-april är typiskt framkallade av produktionstappning i uppströms anläggningar och är inte respons på kraftiga väderhändelser. I simuleringen är det höstsituationer som faller ut som årsmax, d.v.s. flödesrespons på nederbördstillfällen. Sammantaget är den simulerade distributionen av flöden betydligt jämnare än den observerade och styrkan i nederbördshändelser avspeglas i storleken på tillrinningen. Vid flertalet tillfällen ses att verklig uppströms tappning sänkts vid nederbördssituationer (Figur 27) såsom år 2011, 2005 och 1998. Simuleringen ger alltså för dessa tillfällen möjlig flödesrespons som skulle kunnat inträffa om fyllnadsgraden inte tillåtit magasinering och flödesdämpning. Dessa tillfällen syns tydligt när observerad tillrinning avtar samtidigt som modellerad tillrinning har en topp. Utbyggnadsvattenföringen i Slagnäs är $160 \text{ m}^3/\text{s}$ och utskovskapaciteten vid dämpningsgräns överstiger med marginal högsta uppmätta tillrinningen.

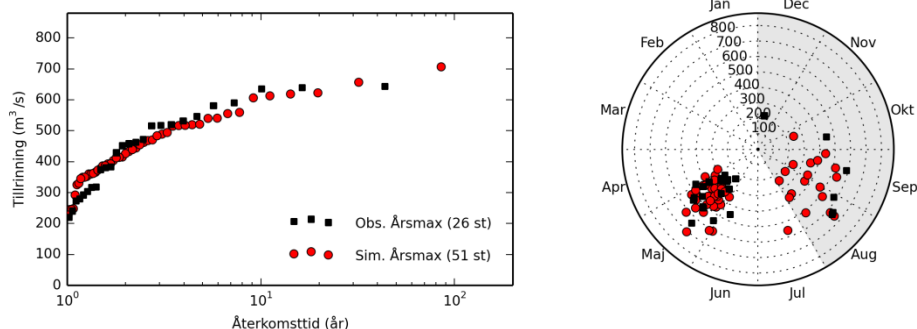


Figur 26. Resultat för Slagnäs i Skellefteälven. Frekvensfördelning av årsmax för observationer (svart) och simulering med standardiserad reglering (röd) i vänster bild. Tidpunkt och storlek av tillrinning i höger bild. Grå bakgrund visar när uppströms magasin tappar tillrinning i simuleringen, d.v.s. från 1:a augusti.

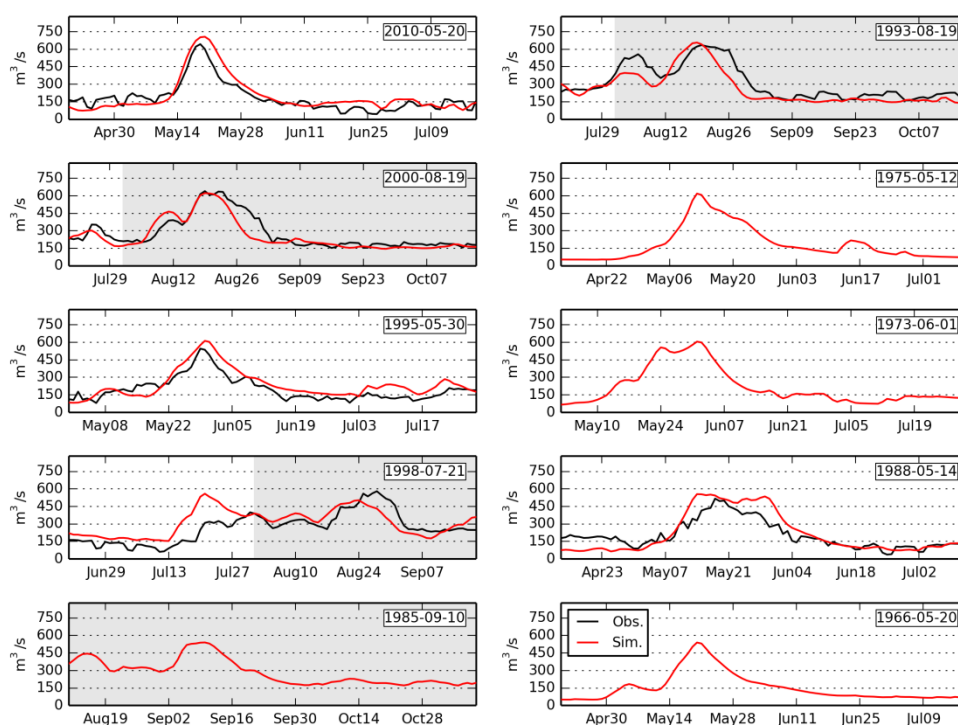


Figur 27. Hydrografer för de 10 st högsta simulerade tillrinningarna till Slagnäs (röd) tillsammans med observerad tillrinning (svart). Grå bakgrund visar när uppströms magasin tappar tillrinning i simuleringen, d.v.s. från 1:a augusti.

I nedre delen av älven finns anläggningar där årsmax är både till följd av vår- och höstflöden. I Figur 28 och Figur 29 visas observerade tillrinningar för Kvistforsen tillsammans med simuleringsresultat. Det syns tydligt att de flesta höga flöden inträffar under maj-juni, men att enstaka högflöden inträffat under augusti-oktober. Under vårfloden i Kvistforsen är bidraget från årsmagasinen vanligen litet, både i observationer och i simuleringen. Den sammantagna bedömningen av historiska mätdata och magasinsvolymer är att det går att upprätthålla låg eller begränsad vartappning från dessa magasin även i mer extrema fall än vad som ingår i beräkningen. Simuleringen ger ungefär samma inbördes proportioner mellan vår och hösttillfällena som i observationsdata. Även för Kvistforsen är distributionen av simulerade flöden jämnare än den observerade. Utbyggnadsvattenföringen i Kvistforsen är 300 m³/s och utskovskapaciteten vid dämningssgräns överstiger med marginal högsta uppmätta tillrinningen.



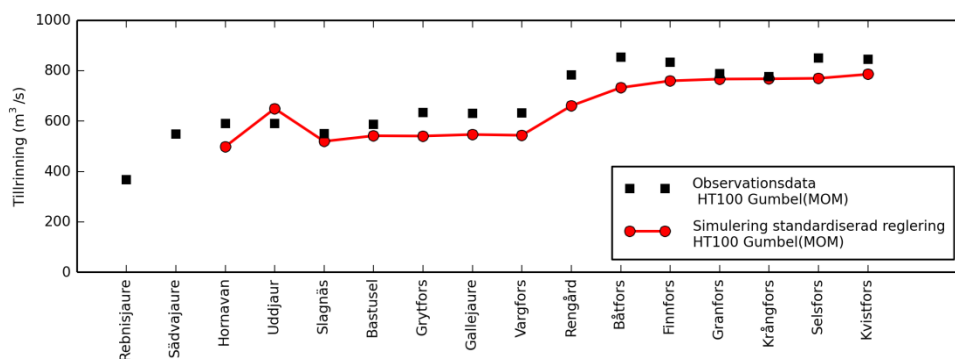
Figur 28. Resultat för Kvistfors i Skellefteälven. Frekvensfördelning av årsmax för observationer (svart) och simulering med standardiserad reglering (röd) i vänster bild. Tidpunkt och storlek av tillrinning i höger bild. Grå bakgrund visar när uppströms magasin tappar tillrinning i simuleringen, d.v.s. från 1:a augusti.



Figur 29. Hydrografer för de 10 st högsta simulerade tillrinningar till Kvistforsen (röd) tillsammans med observerad tillrinning (svart). Grå bakgrund visar när uppströms magasin tappar tillrinning i simuleringen, d.v.s. från 1:a augusti.

Resultaten från simuleringen jämfört med observationsdata för hela Skellefteälven visas i Figur 30. Generellt sett ger frekvensanalysen av simulerade tillrinning lägre HT100, vilket till stor del förklaras av att tidsperioden är längre än för observationsdata. För Kvistforsen har detta detaljstuderats och där beskriver simuleringen i allt väsentligt samma dynamik och extremtillrinning som i observationer. Används samma korta dataperiod där observationsdata finns beräknas HT100 lika i simulering och observationer. En poäng med att använda simuleringen är tillgången till längre dataserier. Används hela simulerade serien för frekvensanalys beräknas HT100 alltså till ett lägre värde än om bara en kortare

del av serien används. Vidare är resultaten av frekvensanalysen konsistent med svagt ökande HT100 på sträckan Båtfors-Kvistfors. Observationsdata ger för samma sträcka varierande HT100, vilket troligtvis beror på att det finns skillnader mellan olika anläggningar när det gäller tillrinningsbestämning och serienas längd.

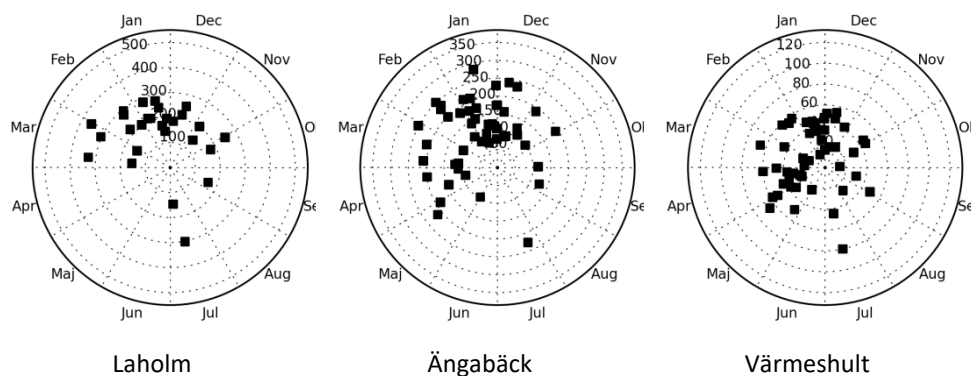


Figur 30. Hundraårstillrinning längs Skellefteälven. Simulering av höglöden med standardiserad reglering samt beräkningar på observationsdata.

Den samlade bedömningen är att den standardiserade regleringen tillräckligt väl beskriver flödesdynamiken i olika delar av älven. Vårflöden dämpas utifrån normala magasinsnivåer, vilket öppnar för att år med stora snömagasin kan generera större spill än år med små snömagasin. Höstflöden modelleras odämpade, vilket överlag ger fler simulerade än observerade höglöden under hösten. Kraftig nederbörd under hösten medför i modellen en eftersökt proportionell flödesrespons, vilket är en viktig skillnad att känna till vid jämförelse med observationsdata. För Skellefteälven kan s.k. aktiv flödesdämpning tillämpas, men de flöden som simuleras i denna studie är ändå under tröskelvärde för att aktivera aktiv flödesdämpning.

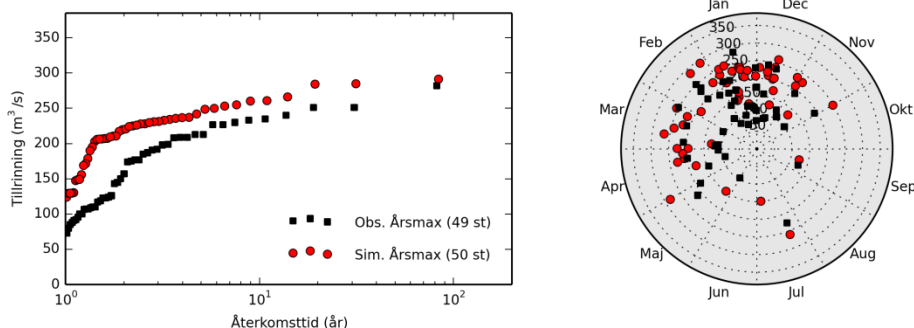
Lagan

Historiska data för reglerad period visar hur höglöden fördelar sig över året och storleksmässigt i Lagan, Figur 31. Eftersom det saknas tydliga spår av säsongsreglering i höglödesstatistiken, är det rimligt att i simuleringen reglera likartat hela året. I simuleringen antas således minimal magasinering d.v.s. magasin tappar tillrinningen. Undantaget från detta Bolmen som har riktlinjer för maxtappning (80 m³/s), vilket respekteras för vattennivåer upp till tät kärnans överkant, varpå tillrinning tappas.

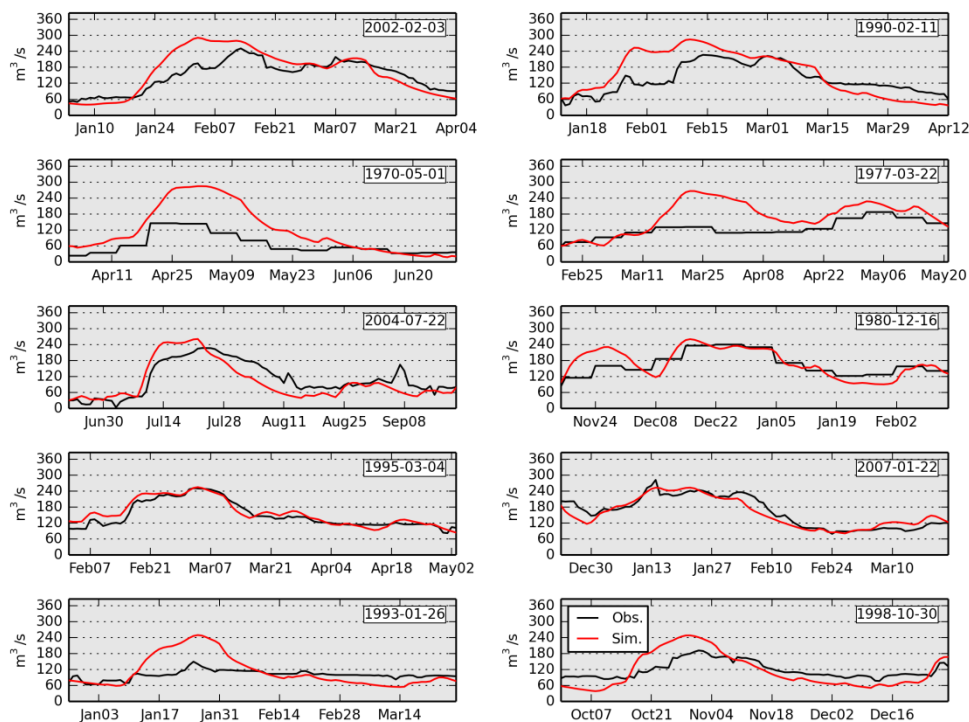


Figur 31. Tidpunkt och storlek för inträffade höga tillrinningar i Lagan vid Laholm, Ängabäck och Värmeshult (nedan Rusken).

Vid Ängabäck är distributionerna av simulerade tillrinningar konsekvent högre än motsvarande för observerade reglerade data, se Figur 32. Eftersom regleringen är måttlig i Lagan är det generellt sett stora likheter mellan observationer och simuleringen, om än något förstärkta i simuleringen, se Figur 33. Utbyggnadsvattenföringen i Ängabäck är 120 m³/s och utskovskapaciteten vid dämningssgräns överstiger med marginal högsta uppmätta tillrinningen.

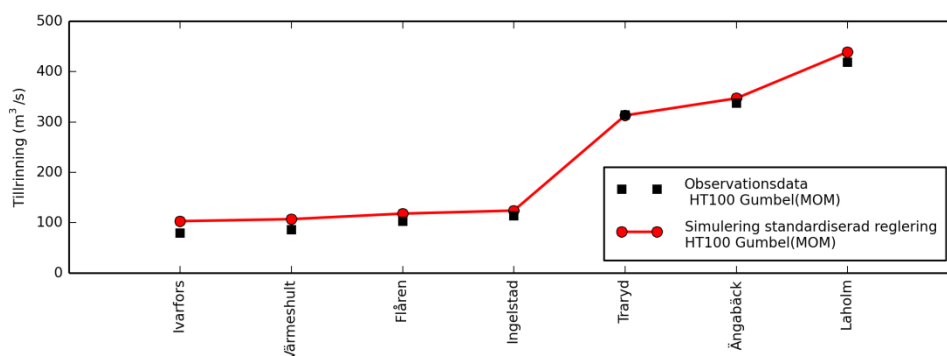


Figur 32. Resultat för Ängabäck i Lagan. Frekvensfördelning av årsmax för observationer (svart) och simulering med standardiserad reglering (röd) i vänster bild. Tidpunkt och storlek av tillrinning i höger bild. Grå bakgrund visar när uppströms magasin tappar tillrinning, d.v.s. under hela simuleringen för Lagan.



Figur 33. Hydrografer för de 10 st högsta simulerade tillrinningar för Ångabäck (röd) tillsammans med observerad tillrinning (svart). Grå bakgrund visar när uppströms magasinerna tappar tillrinning.

Den samlade bedömningen för Lagan är att simuleringen ger högre individuella flödestoppar än observationsdata och att detta slår igenom även frekvenanalysen. Sett till hela vattendraget är HT100 baserat på simulerad tillrinning något högre än HT100 beräknat från observationer, se Figur 34.



Figur 34. Hundraårstillrinning längs Lagan. Simulering av höglöden med standardiserad reglering samt beräkningar på observationsdata.

5.3 MODIFIERAD METODIK FÖR FLÖESDIMENSIONERING KLASS I

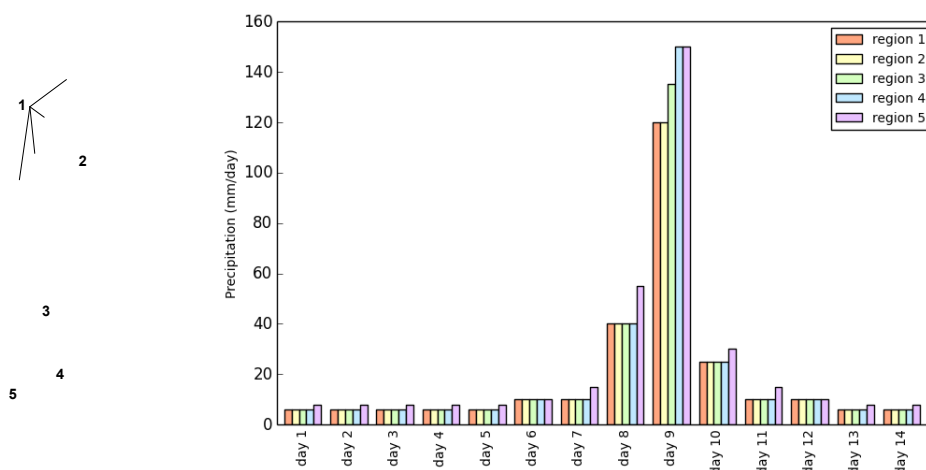
Genom att systematiskt reducera de drivande faktorerna dimensionerande nederbördssekvens och dimensionerande snömagasin i metodiken för flödesdimensionering klass I erhålls lägre beräknade tillrinningar. Metodiken

bygger på korskombination av snösmältnings- och nederbördshändelser tillsammans med schematiska regleringsrutiner enligt riktlinjerna. Återkomsttiden för de ingående drivande faktorerna såväl som resulterande tillrinningar är i allmänhet så stor att det inte är realistiskt att beräkna återkomsttider för dessa händelser baserat på observationer, vilket heller inte är metodens syfte eller styrka. Det finns skillnader i relationen mellan klass I flöden och t.ex. HT100 för olika platser (Bergström, 2008; Brandesten, 2006; German m.fl 2014). Dessa skillnader skulle kunna bero på hur de drivande faktorerna relaterar till historiskt inträffade situationer.

Om de drivande faktorerna reduceras för att med samma metodik ge tillrinning i storleksordning som historiskt inträffat, t.ex. HT100, finns goda skäl att undersöka om drivkrafterna har motsvarighet i inträffade situationer och om grundantaganden för korskombinering är rimliga. Vidare är konsistens i reduceringen av drivkrafterna av vikt för tillämpligheten.

5.3.1 Reducering av dimensionerande nederbördssekvens och dimensionerande snömagasin

Dimensionerande nederbördssekvens är definierad för 5 regioner och avser nederbörd över 1000km², se Figur 35. Sekvensens maximala dygnsintensitet (DimP_{1d}) är ca 120-150 mm/dygn beroende region och motsvarande 14dygnsvolym (DimP_{14d}) är 267-341mm. Nederbördssekvensen har sitt ursprung i de mest extrema observerade situationerna och diskuteras utförligt i Flödeskommiténs slutrapport (Flödeskommitén, 1990).



Figur 35. Dimensionerande nederbördssekvens.

Såväl DimP_{1d} som DimP_{14d} bedöms överslagsmässigt ha återkomsttiden på flera tusen år. I beräkningen justeras dimensionerande nederbördssekvens enligt följande (Svensk Energi, 2015);

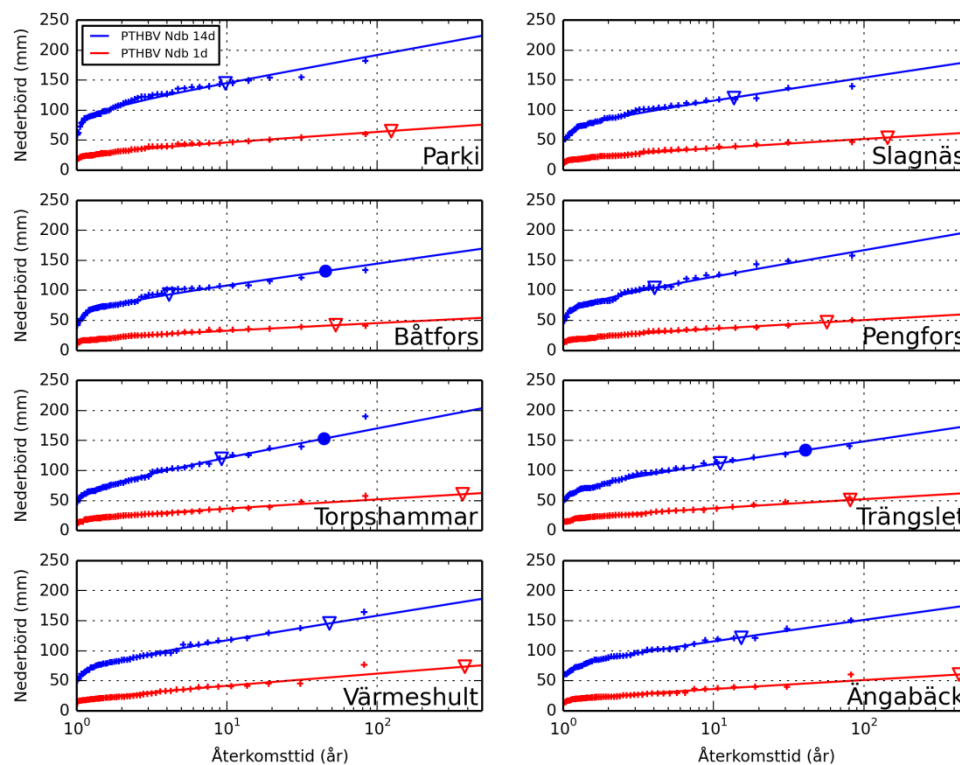
- Arealkorrektion: Sekvensen justeras relativt arean på avrinningsområdet.

- Höjdkorrektion: Sekvensen ökas med ökande höjd på avrinningsområdet (norr om Dalälven)
- Årstidskorrektion: Totalvolym och toppvärde reduceras med årtid.

Den sammantagna effekten av dessa justeringar ger unika nederbördssekvenser för olika anläggningar. Vanligt förekommande storleksordningar på dessa justeringar är för areal+ höjdkorrektion ca +10 till -30 % och för årtidskorrektion 0 till -50 %.

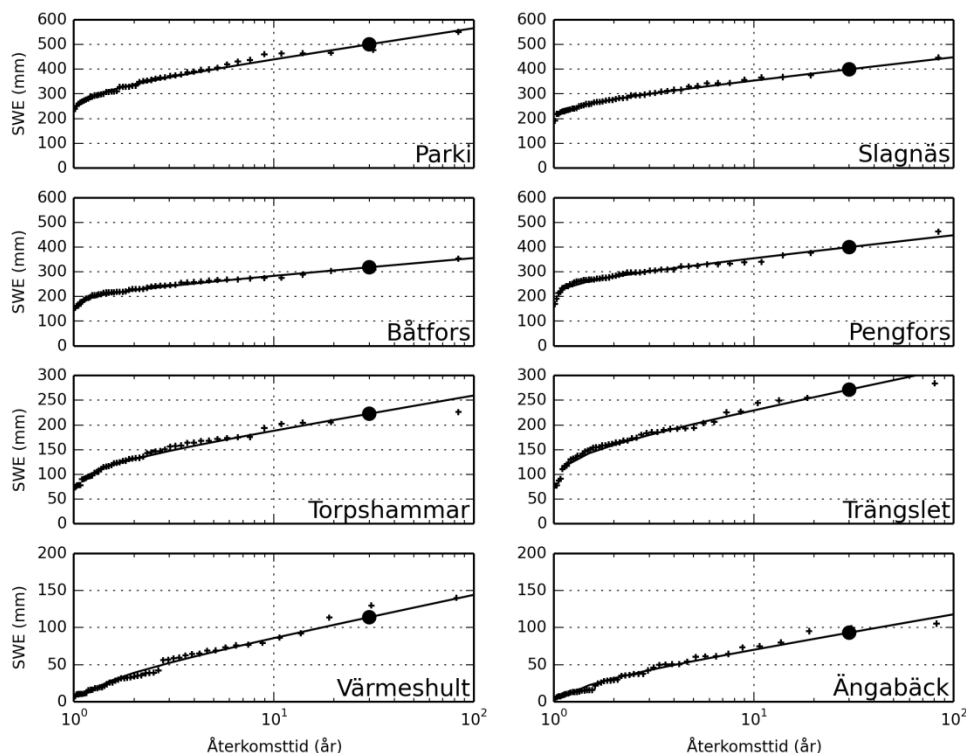
Vid reducering av dimensionerande nederbördssekvens erhålls areell dygnsnederbörd som storleksmässigt kan relateras till historiskt inträffade nederbördshändelser. I Figur 36 visas extremvärdesanalys av arell nederbörd för respektive avrinningsområde samt markering för en 50 % reducerad nederbördssekvens. För flertalet av de studerade avrinningsområdena har en 50 % reducerad nederbördssekvens en bedömd återkomsttid i storleksordningen 10-20 år baserat på DimP_{14d}. För stora områden såsom Pengfors eller små områden såsom Värmeshult är istället den beräknade återkomsttiden kortare (ca 5 år) respektive längre (ca 50 år).

För några anläggningar (Parki, Slagnäs, Pengfors, Värmeshult, Ängabäck) inträffar det dimensionerande tillfället under sommaren när det inte föreligger någon årtidskorrektion. Såväl toppvärde som totalvolym för dessa nederbördssekvenser är stora. Jämfört med frekvensanalysen av arell nederbörd kan konstateras återkomsttiden faller utanför det intervall (<500 år) som illustreras.



Figur 36. Återkomsttid för arell nederbörd P1d och P14d i avrinningsområdet. Fylld ring markerar nederbörd under dimensionerande tillfälle, trianglar markerar nederbördssekvens reducerad till 50 %.

Dimensionerande snömagasinet har en direkt motsvarighet i verkligt inträffade situationer då det per definition har återkomsttiden 30 år för respektive avrinningsområde. För avrinningsområden med en stabil snödynamik torde skalning vara oproblematisht. Snömagasinet redovisas omräknat till vatteninnehåll i millimeter, Snow Water Equivalent (SWE).



Figur 37. Återkomsttid för snömagasinet vatteninnehåll (SWE). Fylld ring markerar snömagasin för ordinarie dimensioneringsberäkning, d.v.s. snömagasin med 30 års återkomsttid.

5.3.2 Beräknad tillrinning vid reducerad nederbördssekvens

Dimensioneringsberäkningar med 50 % reducerad nederbördssekvens ger förändring i tillrinning enligt Tabell 6.

Tabell 6. Förändrad tillrinning vid 50 % reduktion av nederbördssekvens.

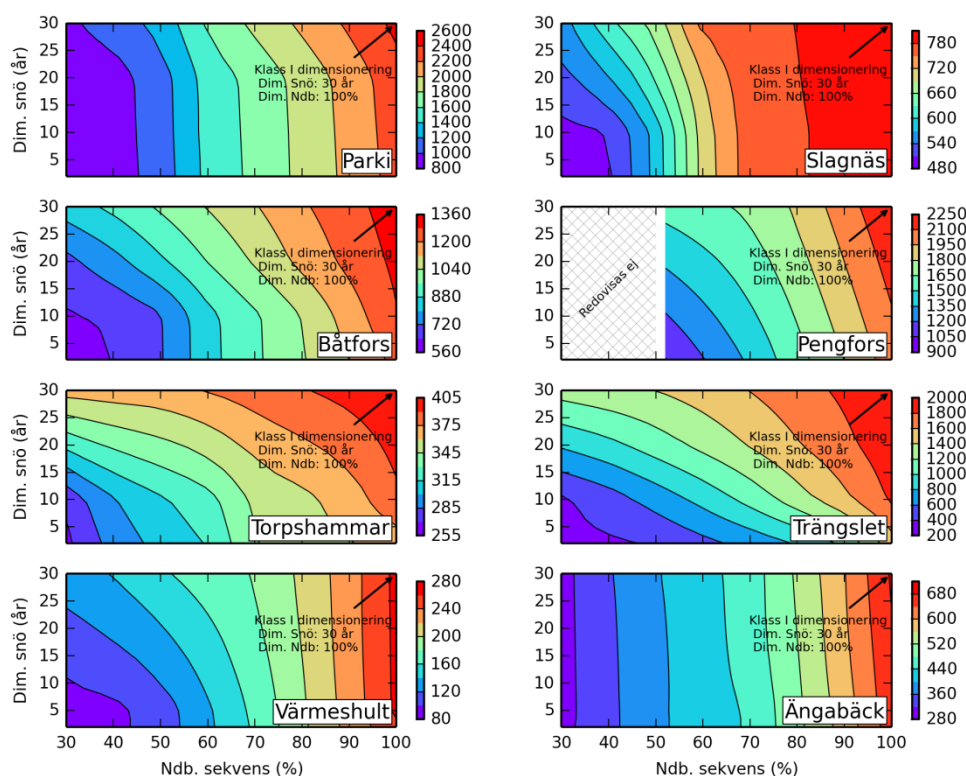
Anläggning	Andel av klass I tillrinning	Kommentar
Lossen*	38 %	Hösttillfälle
Sveg*	77 %	Vårtillfälle
Byarfors*	84 %	Vårtillfälle
Öjeforsen*	83 %	Vårtillfälle
Ängabäck	58 %	Hösttillfälle
Värmeshult	59 %	Hösttillfälle
Torpshammar	92 %	Vårtillfälle (juni)
Pengfors	69 %	Hösttillfälle
Slagnäs	84 %	Höst (juli) Aktiv dämpning
Trängslet	71 %	Vårtillfälle

Anläggning	Andel av klass I tillrinning	Kommentar
Båtfors	74 %	Vårtillfälle
Parki	52 %	Hösttillfälle

*Beräknat av Brandesten m.fl., 1999

5.3.3 Beräknad tillrinning vid reducerad nederbördssekvens och reducerat snömagasin

Dimensioneringsberäkningar med korskombination av reducerad nederbördssekvens och reducerat snömagasin ger tillrinning enligt Figur 36. I övre högra hörnet finns beräkningen enligt ordinarie riktlinjer för klass I-flöde (röd färg), vilket är den största beräknade tillrinningen. Färggradienten från rött till blått visar för respektive anläggning hur tillrinningen minskar när nederbördssekvens (x-axeln) och snömagasin (y-axeln) reduceras. En horisontell gradient visar på att beräkningen i första hand påverkas av reducering i nederbördssekvens. En diagonal gradient visar på att beräkningen både påverkas av reducering i nederbördssekvens och snömagasin. HT100 för anläggningarna är av storleksordning; Parki 850 m³/s, Slagnäs 500 m³/s, Båtfors 800 m³/s, Pengfors 1400 m³/s, Torpshammar 300 m³/s, Trängslet ca 800 m³/s, Värmeshult 100 m³/s och Ängabäck 300 m³/s. Resultaten pekar på att reducering av nederbördssekvens till 30-50 % av orginalekvensen och reducering av snömagasinet till 5-10 års återkomsttid ger tillrinning i storleksordningen HT100. Pengfors och Trängslet skiljer ut sig. För Pengfors är områdets storlek huvudorsaken och för Trängslet är det tillrinnande volym som ger variation av snömagasinets betydelse.



Figur 38. Beräknad tillrinning med modifierad klass I metodik. Kombinationseffekt av reducerad nederbördssekvens och reducerat snömagasin.

Flera anläggningar förefaller okänsliga för reducering av snömagasinet, vilket till stor del förklaras av att dimensioneringstillfället är nederbördsdominerat. Undantaget är Trängslet där tillrinnande volym är en viktig parameter. Resultaten tyder på att avsmältning av snömagasinet i första hand bidrar till att fylla magasinen medan nederbördssekvensen har en avgörande roll för maximal tillrinning. I detalj;

Värmeshult och Ängabäck

Det dimensionerade tillfället är nederbördsdominerat medan påverkan av snösmältning är försumbart. Låg känslighet för reducering av snömagasinet, vilket troligen är generellt i södra Sverige. Avrinningsområden storlek ger måttlig arealkorrektion.

Slagnäs och Båtfors

Aktiv dämpning styr initialt responsen om reducerad nederbördssekvens används.

Pengfors

Det dimensionerade tillfället är nederbördsdominerat. Påverkan av snösmältning är liten och därmed låg känslighet för reducering av snömagasinet. Stort avrinningsområde medför stor arealkorrektion av nederbördssekvens.

Parki

Området har en stor dimensionerande nederbördssekvens på grund av en stor höjdkorrektion. Dimensionerande tillfälle är sommartid då nederbördssekvensen är som störst. Bidraget från snösmältning är naturligtvis viktigt, men snarare för att volymmässigt fylla magasinen än för maximal tillrinning. Temperatur och höjdförhållanden ger heller inte förutsättning för snösmältning att generera högre tillrinning än bidraget från dimensionerande nederbördssekvens.

Erfarenheterna från simulering med reducerade drivkrafter i klass I-metodik;

- **Återkomsttid för reducerad nederbördssekvens**
Reduceras dimensionerande nederbördssekvens kraftigt är det i princip möjligt att relatera den till frekvensanalys av areell nederbörd. Sekvenserna är unika för varje avrinningsområde, medan observerad data inte uppvisar lika stora skillnader.
- **Årstidskorrektion**
Årstidskorrektionens utformning på våren har avgörande betydelse för huruvida en kombinerad nederbörds-/snösmältningshändelse kan överträffas av en ren nederbördshändelse under sommarperioden när årstidskorrektionen är 100 %.
- **Snömagasin**
Extremvärden för snömagasinen följer antagen fördelningsfunktion (Gumbel) rimligt väl -speciellt i de delar av landet som har stabil snödynamik. Att skalera snömagasinet i termer av återkomsttid bör vara oproblematiskt. För anläggningar i södra Sverige följer snömagasinet eventuellt inte en gumbelfördelning väl, men där är det av underordnad betydelse för beräkning av klass I-tillrinning.
- **Dimensionerande tillfälle**
När de ingående drivkrafterna förändras mycket förändras ibland även tillfället (datum) som faller ut som dimensionerande.

- **Anläggnings specifika uppgifter**

Metodiken för flödesdimensionering klass I bygger på antagandet om en förväntad kraftig vårflood. Fyllnadsgraden i magasin och strategier för uppfyllnad är eventuellt inte tillämpliga för måttliga snömagasin, vilket kan bli fallet om snömagasinet reduceras alltför kraftigt.

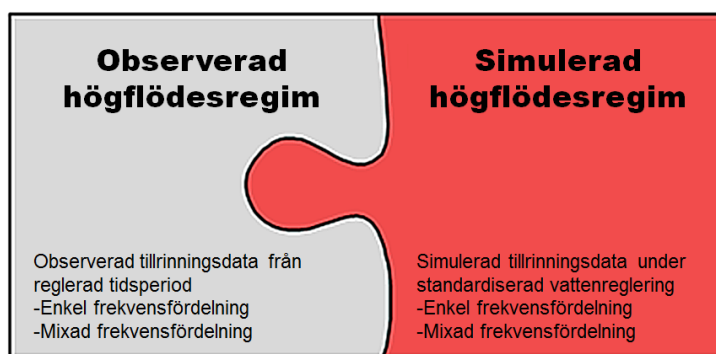
Slutsatsen av ovanstående är att det är svårt att över landet skapa konsistenta reduktionsfaktorer för skalning av dimensionerande nederbörd och snömagasin för att klass I-metodiken ska generera tillrinning med återkomsttiden omkring hundra år.

6 Diskussion

I denna rapport har metoder för att beräkna tillrinning med 100 års återkomsttid jämförts. Vid frekvensanalys av observationsdata finns möjlighet att använda tekniker som har förutsättningar att beskriva utseendet av data som förekommer i reglerade vattendrag. Hydrologisk modellering med standardiserade regleringsrutiner öppnar möjligheten att generera långa serier för frekvensanalys.

Frekvensanalys av observationsdata är internationellt sett en mycket populär metod för beräkning av dimensionerande flöde. Tekniken omgärdas av praktiska och principiella begränsningar, vilka båda är av större betydelse för tillämpningar i reglerade än i oreglerade vattendrag. I många fall är analysen hänvisad till ett litet dataunderlag med okänd mätnoggrannhet. Observationsdatas verkliga fördelning är alltid okänd och någon känd sannolikhetsfördelning antas vanligtvis som approximation. Data från reglerade vattendrag uppvisar stor variation. Somliga dataserier kan beskrivas rimligt väl med en känd sannolikhetsfördelning, men det är vanligt att överensstämmelsen mellan data och frekvensfördelning är låg.

Denna rapport visar på metoder som kan bidra till att öka tilltron till de HT100 som beräknas i reglerade vattendrag både genom utvecklade metoder för frekvensanalys och genom analyser av alternativt underlag, illustrerat i Figur 39. Synsättet att använda flera metoder och beräkningar baserat på olika underlag för att söka en praktiskt orienterad systemförståelse och processbeskrivningar är i linje med budskapet från flera författare (Klemeš, 1993; Merz & Blöschl 2008a/2008b; Rogger m.fl. 2012a; Sayers m.fl. 2014). För att upptäcka och kvantifiera eventuella förändringar i höglödesregimer (Hall m.fl., 2014) förordas också att syntetisera olika tekniker. Data från reglerade vattendrag visar ofta på tröskeeffekter vilka är önskvärt att öka förståelsen för.



Figur 39. Principskiss för hur metoderna i denna rapport bidrar till beräkning av HT100. Mixade frekvensfördelningar är ytterligare ett verktyg för frekvensanalys medan hydrologisk simulering med standardiserad vattenreglering ger alternativt underlagsdata.

Inverkan av vattenreglering på höglöden är ett komplicerat fält och det saknas internationellt sett generella vägledningar för att ta hänsyn till detta. En bidragande orsak är att syftet med reglering varierar liksom planeringshorisonten

och graden av samordning längs vattendrag. I Sverige är huvudsyftet med vattenreglering kraftproduktion och inte flödesdämpning, men den dämpande effekten är tydlig speciellt i norra delen av landet. Utbyggnaden av vattendrag har ofta medfört en förändrad höglödesregim, vilket blir tydligt när reglerad och naturlig flödesregim jämförs. Snödrivna vårflöden i ett vattendrag blir generellt lägre vid utbyggnad. Höga tillrinningar sommar och höst ger däremot ofta höga flöden eftersom magasinen denna period har hög fyllnadsgrad.

Säsongsvariationen i fyllnadsgrad medför en årstidsberoende känslighet för höga tillrinningar i stora delar av landet, vilket i praktiken betyder känslighet för kraftiga regn under höst och vinter. Ett magasin kan i regel tappa tillrinning utan flödesdämpning, medan en naturlig sjö alltid ger viss flödesdämpning eftersom avbördningen styrs av vattennivån, vilken stiger långsamt under en höglödessituation. En längre diskussion om reglerade vattendrag och höga flöden finns i *Höga vattenflöden i reglerade älvar* (Bergström, 1999).

I USA och Canada har en metod använts som etablerar relationer mellan oreglerade/reglerade höglöden (USACE, 2010) men detta bedöms inte applicerbart i stora delar av Sverige. Skälet är att skalfaktorer eller relationer mellan olika percentiler förefaller orimligt när höglöden genereras av olika typ av drivkrafter för oreglerade respektive reglerade förhållanden. Vidare används ibland stokastisk modellering för att generera både väderhändelser och initiala magasinshöjder exempelvis i SEFM (MGS, 2001). För svenska förhållanden är det en utmaning att generera konsistent stokastisk drivdata över stora avrinningsområden.

6.1 OBSERVATIONSDATA

Observationsdata beskriver situationer som inträffat, men begränsas till att visa den integrerade flödesresponsen av markförhållanden och reglering till bakomliggande drivkrafter såsom nederbörd eller snösmältning. Det är vanligt att måttligt höga tillrinningar "maskeras" i och med att de magasineras eller dämpas kraftigt. Det förekommer också att höga tillrinningar förstärkts genom att uppströms tappning ökas, även om detta är mindre vanligt. Tillrinningsdata från reglerade vattendrag är således ofta underrepresenterade i vissa intervall och innehåller mer tröskleffekter än data från oreglerade vattendrag.

Grundantaganden om slumpmässighet som är viktigt i standardmässig frekvensanalys utmanas alltså starkt i många fall.

De stora valmöjligheterna inom frekvensanalys hanteras i vägledningar i huvudsak genom antingen föreskrivna teknikval (England, 2015) eller föreslagna teknikval (Svensk Energi, 2015; NVE, 2011) i syfte att uppnå viss enhetlighet eller standardisering. Långtgående standardisering ger inte nödvändigtvis bättre skattningar av extremflöden (Wilson, 2011) utan en viss flexibilitet och utrymme för hydrologisk experttolkning kan vara önskvärt. Det är dock olämpligt om många olika typer av frekvensfördelningar används för olika platser i ett och samma vattendrag, eftersom höglöden rent fysikaliskt är länkade mellan platser och således bör kunna beskrivas med likartad statistisk process.

En principiell utmaning med att basera beräkningar på observerad reglerad vattenföring är den bristande kopplingen mellan de naturliga drivkrafterna när det

gäller storleken och ibland även tidpunkten för observerade högflöden, vilket gäller alla metoder som bygger på observationsdata. Standardmässig frekvensanalys drabbas hårt av detta eftersom storleksinformationen i alla observerade årsmax (även de mest reglerade) används för att beräkna HT100. Högflöden som erhållits under normal drift av vattenkraftsystemet bidrar inte med nyttig storleksinformation för frekvensanalys av extremer såsom HT100. Mixade fördelningar såsom TCEV-WG har något bättre förutsättningar eftersom de delvis kan frikoppla frekvensfunktionen i lågt/högt flödesregister, d.v.s. HT100 baseras i större utsträckning på höga observationer som eventuellt är mindre påverkade av reglering. När standardmässiga verktyg för frekvensanalys inte väl beskriver de data som kan förekomma i kraftigt reglerade vattendrag finns goda skäl att titta på alternativa metoder. De verktyg som används behöver förmågan att beskriva grundläggande utseende i observationsdata som förekommer såsom över/-underrepresentation av flöden i olika flödesregister. Oavsett val av frekvensfördelning behövs dock en ansevärd längd på underlagsmaterialet för precisa beräkningar av HT100, vilket visats av Hisdal m.fl (2013)

Trots begränsningarna är frekvensanalys ett praktiskt verktyg som i många fall kan ge god indikation på storleksordningen för tillrinning med 1 % årlig sannolikhet att överskridas, HT100. Mycket arbete har lagts ner på att förbättra de matematiska aspekterna t.ex. frekvensfördelning (Gumbel, 1958; Rossi, 1984), mätosäkerhet (Lang m.fl, 2010; Neppel m.fl, 2010; Petersen-Overleir & Reitan, 2009), inkludering av icke-instrumentella data (Benito & Thorndycraft; 2005; Cohn m.fl. 1997; Gaál m.fl. 2010; Reis & Stedinger, 2005 ; Strupczewski m.fl. 2014), icke-stationaritet (Coles, 2001; Cunderlik & Burn, 2003; Katz m.fl., 2002) medan få framsteg nåtts inom tillämpningar för reglerade flödesregimer. För beräkningar i svenska reglerade vattendrag är dataunderlaget ofta för litet för att tillgodogöra sig alltför sofistikerade metoder. Förbättrad konsistens och precision i HT100 beräkningar med frekvensanalys löses alltså inte enkelt genom att t.ex. föreskriva frekvensfördelning och parameterskattningsmetod. Användare bör dock känna till de karaktärsdrag som respektive frekvensfördelning och parameterskattningsmetod har, då de i allmänhet ger mycket olika resultat.

De frekvensfördelningar (Lognormal, Gumbel och Gamma) som nämns i nuvarande svenska riktlinjer är ofta rimliga kandidater.

Parameterskattningsmetoder omnämns inte explicit i riktlinjerna, men har avgörande inverkan på slutresultatet om observationsdata är mycket olika de fördelningar som ska anpassas. Parameterskattning med momentmetoden (MOM), Linear moments (L-MOM) eller probability weighted moments (PWM) framhålls ofta för hydrologiska data (Stedinger, 1993; Wilson, 2011).

Parameterskattningsmetoden Maximum likelihood (MLE) tappar i vissa sammanhang sina fördelaktiga egenskaper (Markiewicz m.fl, 2010), vilket också noterats i detta projekt.

För Sverige finns nationellt heltäckande högflödesstatistik (Bergstrand m.fl., 2014) baserat på gumbelfördelning och momentmetoden, syftet med detta material är dock inte lokal dimensionering.

6.2 HYDROLOGISK MODELLERING MED STANDARDISERAD REGLERING

I många fall kan huvuddragen i vattenregleringen beskrivas med en hydrologisk modell och HT100 beräknas från simulerad tillrinning under standardiserade regleringsrutiner. Högflödespotential i historiska väderhändelser kan beräknas, jämföras och åskådliggöras i och med att reglering och flödesdämpning ges en likartad beskrivning. Modellsimuleringar kan i allmänhet göras för långa perioder, minst 50 år, vilket är fördelaktigt om frekvensanalys ska tillämpas.

Simulerad reglerad flödesregim kan ses som ett sätt att kombinera faktiska historiska tillrinningssituationer med normala eller ogynnsamma magasinsnivåer. Erfarenhetsmässigt har flertalet högflödessituationer i reglerade system inträffat under perioder med välfyllda magasin, exempelvis kraftiga höstregn. Driftsorganisationer för vattenhushållning planerar för vårflöden och dessa prognostiseras i allmänhet. Vårtid är dessutom magasinerna avsänkta. Under hösten är prognosförmågan lägre samtidigt som magasinerna har högre fyllnadsgrad, d.v.s känsligare system. Det är viktigt att dimensioneringsberäkningar och riskanalyser lyfter fram potentialen i nederbördsdrivna höstflöden, som ofta maskeras i observationsdata på grund av reglering.

Analys av en standardmässigt reglerad flödesregim kan ses som ett komplement för att värdera HT100 som beräknas på observationsdata. Dessutom finns möjlighet att öka förståelsen för vilka typer av tillrinningshändelser som är av störst betydelse för en anläggning och hur eventuella förändringar i reglerstrategier påverkar. Analys av naturlig flödesregim kan vara aktuell att överväga om den reglerade högflödesregimen har stora likheter med den naturliga med avseende på högflödessäsong och högflödesprocess.

Beskrivningen av reglering i den hydrologiska modellen bör eftersträva stor enkelhet, för att inte övervärdera regleringsmöjligheter. Antagandet om fyllda magasin från 1:a augusti, korresponderar mot antaganden i metodiken för flöden i flödesdimensionerings klass I och tjänar syftet att i alla delar av landet simulera regnhändelser på hösten konservativt. Resultaten visar att datumet i sig inte är kritiskt.

I ett vidare perspektiv, dock utanför detta projekt, finns ett behov av att bedöma högflöden i reglerade vattendrag för ett klimat i förändring. En modellbaserad ansats är en rimlig lösning som kan beskriva förändrad högflödesrespons i reglerade vattendrag bättre än att anta naturliga förhållanden (Bergström m.fl. 2012; Sjökvist m.fl., 2015).

7 Slutsatser

Denna rapport beskriver svensk och internationell metodik för flödesdimensionering med fokus på beräkning av tillrinning med 100 års återkomsttid i reglerade vattendrag. Nedan ges slutsatser som dragits från arbetet.

Frekvensanalys är internationellt sett en mycket vanlig metod för beräkning dimensionerande flöde, däribland tillrinning med 100 års återkomsttid. I såväl svensk som internationell litteratur behandlas vattenregleringens inverkan på höglöden sparsamt och det saknas generell vägledning för hur hänsyn ska tas till regleringar vid beräkningar. Samtidigt konstateras att det är ett område av vikt att arbeta fram principer inom. Denna rapport bidrar till ökad kunskap om svårigheter och möjligheter när det gäller att beräkna återkomsttider för tillrinning i reglerade vattendrag.

I tillämpningsexempel visas nuvarande praxis och nya metoder för beräkning av HT100. Den för Sverige nya metoden med mixade frekvensfördelningar (TCEV-WG) tillför egenskaper som är intressanta för användning i reglerade vattendrag. Hydrologisk modellering med standardiserade regleringsrutiner är värdefullt för att förstå och göra beräkningar av höga flöden och bidrar med ett vattendragsperspektiv. I projektet har följande erfarenheter erhållits;

- Frekvensanalys av observationsdata är trots kända svagheter standardmetoden för att bestämma HT100.
- Beräkningsmetoder för HT100 bör kunna representera de processer som är framträdande och drivande för höga flöden i en reglerad flödesregim.
- Hydrologisk modellering med standardiserade regleringsrutiner kan ge konsistenta underlag för beräkning av ett alternativt HT100.
- Hydrologisk modellering kan identifiera höglödespotentialen under perioder som magasin kan förväntas vara fulla och därmed känsliga för höga tillrinningar. Erfarenhetsmässigt har flera höglöden inträffat samtidigt som fyllnadsgraden varit hög.

Metoder som undersökts men för närvarande inte rekommenderas är icke-parametrisk frekvensanalys (KDE) liksom modifierad klass I metodik. Naturlig flödesregim är i många fall alltför olik den reglerade flödesregimen för att vara ett rimligt underlag.

Rekommendationer;

- Frekvensanalys gynnas av flexibilitet i teknikval, dock bör frekvensfördelning och parameterskattningsmetod motiveras och dokumenteras.
- För reglerade vattendrag där standardmässig frekvensanalys inte fungerar väl trots stort dataunderlag kan mixade frekvensfördelningar, t.ex. TCEV-WG vara ett alternativ.
- Hydrologisk modellering med standardiserade regleringsrutiner är ett verktyg som visat potential och som med fördel utvärderas för fler vattendrag.

8 Referenser

- Arheimer, B., Lindström, G. (2014). Electricity vs Ecosystems – understanding and predicting hydropower impact on Swedish river flow. In: *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water–Society Interactions* Proceedings of ICWRS2014, Bologna, Italy, June 2014 (IAHS Publ. 364, 2014). Pages 313–319.
- Arheimer, B., Lindström, G. (2015). Climate impact on floods – changes of high flows in Sweden in the past and the future. *HESS* 19, 771–784, 2015. doi:10.5194/hess-19-771-2015
- Arnaud, P. , Lavabre, J. (2002). Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resour. Res.* 38(6), 1075–1085.
- Benito, G., Thorndycraft, V.R. (2005). Palaeoflood hydrology and its role in applied hydrological sciences. *Journal of Hydrology* 313, 3–15.
- M. Beran, J.R.M. Hosking, N. Arnell.(1986). Comment on "Two-component extreme value distribution for flood frequency analysis, by F. Rossi, M. Fiorentino, P. Versace. *Water Resources Research*, 22 (2) (1986), pp. 63–266
- Bergstrand, M., Asp, S., and Lindström, G.(2014). Nationwide hydrological statistics for Sweden with high resolution using the hydrological model S-HYPE, *Hydrol. Res.*, 45, 349–356
- Bergström, S. (1999). Höga vattenflöden i reglerade älvar. SMHI.
- Bergström, S., Andréasson, J. , Graham L.P. (2012). Climate adaptation of the Swedish guidelines for design floods for dams. *ICOLD 24th Congress Kyoto 2012*, Q94
- Bradlow, D. D., Palmieri, A., Salman, S. M. A. (2002). Regulatory frameworks for dam safety, The World Bank, Washington DC.
- Brandesten, C.-O., Larsson, P., Uljanova, M. (2006). Dammsäkerhet - Uppföljning dimensioneringsberäkningar. *Elforsk rapport 06:10*
- Castellarin, A., Kohnová, S., Gaal, L., Fleig, A., Salinas, J. L., Toumazis, A., Kjeldsen, T. R. and MacDonald, N. (2012). Review of applied statistical methods for flood frequency analysis in Europe : WG2 of COST Action ES0901. Other. (NERC) Centre for Ecology & Hydrology.
- CDA (2007). Dam safety guidelines. Canadian Dam Association (CDA)
- CEH (2009). FEH CD-ROM 3, Wallingford: Centre for Ecology & Hydrology.
- Coles, S. (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer, London.
- Cohn, T.A., Lane, W.L., Baier, W.G., (1997). An algorithm for computing moments-based flood quantile estimates when historical flood information is available: *Water Resources Research*, v. 33, p. 2089–2096.

- Connell, R. & Pearson, C. (2001). Two-component extreme value distribution applied to Canterbury annual maximum flood peaks. *Journal of Hydrology (NZ)*, 4 (2), 105 -127.
- Cunderlik, J. M. and Burn, D. H. (2003). Non-stationary pooled flood frequency analysis *Journal of Hydrology*, Volume 276, Issue 1, p. 210-223.
- Cunnane, C. (1985). Factors affecting choice of distribution for flood series, *Hydrological Sciences Journal*, 30:1, 25-36, DOI: 10.1080/02626668509490969
- Donnelly C. R., Bechai, M. Trias M., Vaillancourt, J. Roy, A. (2009). The development of a national dam safety standard for parks Canada. CDA 2009 Annual Conference, Whistler, British Columbia, Canada
- England, J., Velleux, M., and Julien, P. (2007). Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed. *Journal of Hydrology*, 347(1):229-241.
- England, J.F. (2011). Flood frequency and design flood estimation procedures in the United States: Progres and challenges. *Australian Journal of Water Resources*, vol 15, no 1., pp33-46.
- England Jr., J.F., Cohn, T.A., Faber, B.A., Stedinger, J.R., Thomas Jr., W.O., Veilleux, A.G., Kiang, J.E., and Mason, R.R., (2015). Guidelines for Determining Flood Flow Frequency – Bulletin 17C: U.S. Geological Survey
- Faulkner, D. (1999). Rainfall Frequency Estimation, Volume 2 of the Flood Estimation Handbook, Institute of Hydrology.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2013). Federal Guidelines for Dam Safety: Selecting and Accommodnting Inflow Design Floods for Dams, FEMA P-94,
- Flödeskommittén (1990). Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. Slutrapport från Flödeskommittén. Statens Vattenfallsverk, Svenska Kraftverksföreningen, Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut.
- FrCOLD (1994). Design flood determination by the gradex method. French Committee on Large Dams
- FrCOLD. (2002). Small dams, guidelines for design, construction and monitoring. Cemagref Editions and Engref (France), with French Committee on Large Dams. ISBN 2-85362-551-6
- FrCOLD(2013). Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages. French Committee on Large Dams
- Gaál, L., Szolgay, J., Kohnová, S., Hlavcová, K., and Viglione, A. (2010). Inclusion of historical information in flood frequency analysis using a Bayesian MCMC technique: a case study for the power dam Orlík, Czech Republic, in: *Contributions to Geophysics and Geodesy*, ISSN 1335-2806, Vol. 40, 121–147, 2010.

- Garavaglia, F., Lang, M., Paquet, E., Gailhard, J., Garçon, R. og Renard, B. (2011). Reliability and robustness of rainfall compound distribution modell based on weather pattern sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2):519-532.
- German, J., Söderling, J. och Hamberg, C. (2014). Dammsäkerhet. Uppföljning av dimensioneringsberäkningar – Kompletterande uppföljning t.o.m. 2013. Elforsk rapport 14:52.
- Gumbel, E.J. (1958). *Statistics of Extremes*, Columbia University Press, New York
- IH - Institute of Hydrology (1999). *Flood Estimation Handbook*, 5 Volumes, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Interagency Advisory Committee on Water Data (IACWD) (1982) *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*, Bulletin 17-B, Hydrology Subcommittee.
- Isomäki, E., Maijala, T., Sulakakoski, M., Torkkel, M.(2012). *Dam Safety Guide*, Häme Centre for Economic Development, Transport and the Environment.
- Johansson, B., (2002). *Estimation of areal precipitation for hydrological modelling*. Ph.D Thesis, Earth Sciences Centre, Department of Physical Geography, Göteborg University, Doctoral Thesis A76.
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kriaučiūnienė, J., Kundzewicz, Z. W., Lang, M., Llasat, M. C., Macdonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., and Blöschl, G.(2014). Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2735-2772,
- Hisdal, H., Thorarinsdottir, T.L., Alfredsen, K., Lawrence, L., Løland, L., Midttømme, G.H. og Tveito, O.E. (2013). Status for veier til bedre flomestimering i Norge. SAMBA/23/13, Norsk Regnesentral, Oslo, 39 s.
- Hosking, J.R.M. (1990). L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 52, 105-124.
- Katz RW, Parlange MB, Naveau P (2002). Statistics of extremes in hydrology. *Adv Water Resour* 25: 1287–1304
- Kidson R.L. and Richards K.S. (2005). Flood frequency analysis: assumptions and alternatives. *Progress in Physical Geography* 29(3): 392-410
- Kjeldsen, T.R. (2007). The Revitalised FSR/FEH Rainfall-Runoff Method. *Flood Estimation Handbook Supplementary Report No. 1*. Centre for Ecology & Hydrology.
- Kjeldsen TR, Jones D A , Bayliss A C (2008). Improving the FEH statistical procedures for flood frequency estimation. Final Research Report to the Environment Agency, R&D Project SC050050, CEH Wallingford, UK.

- Klemeš, V., (1993). Probability of extreme hydrometeorological events – a different approach. In: Proceedings of the Yokohama Symposium, Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts, Yokohama, Japan, vol. 213. IAHS Publ., pp. 167–176.
- Kochanek, K. Renard, B. Arnaud, P. Aubert, Y. Lang, M. (2014). A data-based comparison of flood frequency analysis methods used in France. Natural Hazards and Earth System Sciences, European Geosciences Union (EGU), 2014, 14, p. 295 - p. 308.
- Laio, F., Di Baldassarre, G., & Montanari, A. (2009). Model selection techniques for the frequency analysis of hydrological extremes. Water Resources Research, 45(7)
- Landwehr, J. M., Matalas, N. C., & Wallis, J. R. (1980). Quantile Estimation With More or Less Floodlike Distributions. WATER RESOURCE RESEARCH, 16(3), 547–555.
- Lang, M., Pobanz, K., Renard, B., Renouf, E. & Sauquet, E. (2010). Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis. Hydrol. Sci. J. 55(6), 883–898.
- Lawrence, D., Paquet, E., Gailhard, J., Fleig, A. (2014) Stochastic semi-continuous simulation for extreme flood estimation in catchments with combined rainfall-snowmelt flood regimes. Nat. Hazards. Earth Systems Science Discussions 1(6), 6785-6828.
- Lindström, G.(1993). Floods in Sweden - Trends and Occurrence. SMHI RH No. 6.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. and Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 model. Journal of Hydrology 201, 272-288.
- Lindström, G. (1999). Trends and variability in Swedish floods. In: Hydrological Extremes: Understanding, Predicting and Mitigating (ed. by L. Gottschalk, J. C. Olivry, D. Reed & D. Rosbjerg) (Proc. Birmingham Symp., July 1999), 91–98. IAHS Publ. no. 255.
- Lindström, G. & Bergström, S. (2000). Floods in regulated rivers and physical planning— Analysis of recent events in Sweden. Contribution to the European Conference on Advances in Flood Research, Potsdam, Germany, November 2000.
- Lindström, G. , Bergström, S. (2002). Runoff trends in Sweden 1807–2002 / Tendances de l'écoulement en Suède entre 1807 et 2002, Hydrological Sciences Journal, 49:1, 69-83
- Lindström, G. (2011). Klimat, vattentillgång och höga flöden i Sverige 1860-2010. Elforsk rapport 11:73.
- Lu, J. .(2013). Statistical analysis of mixed population Flood Series. Msc. Thesis Cornell University

- Madsen, H., Pearson, C.P., Rasmussen, P.F., Rosbjerg, D., B.(1997). Comparison of annual maximum series and partial duration series methods for modelling extreme hydrological events 1. At-site modelling, *Water Resour. Res.* 33
- Madsen, H.; Lawrence, D.; Lang, M.; Martinkova, M.; Kjeldsen, T.R. (2013). A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment. NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 180pp.
- Malamud BD, Turcotte DL (2006). The applicability of power-law frequency statistics to floods. *Journal of Hydrology* 322:168-190
- Markiewicz I., Strupczewski W. G., Kochanek K. (2010). On accuracy of upper quantiles estimation, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 14, No. 11
- Martins, E.S., Stedinger, J.R. (2000). Generalized maximum-likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data. *Water Resources Research* 36
- Merz, B. & Thielen, A. H. (2005). Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis. - *Journal of Hydrology*, 309, 1-4, pp. 114-132
- Merz, R., and G. Blöschl (2008a). Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information, *Water Resour. Res.*, 44, W08432
- Merz, R., and G. Blöschl (2008b). Flood frequency hydrology: 2. Combining data evidence, *Water Resour. Res.*, 44, W08433
- MGS Engineering Consultants, Inc. (MGS) (2001). General Storm Stochastic Event Flood Model (SEFM) - Technical Support Manual.
- Neppel, L., Renard, B., Lang, M., Ayrat, P. A., Coeur, D., Gaume, E., Jacob, N., Payrastre, O., Pobanz, K. & Vinet, F. (2010). Flood frequency analysis using historical data: accounting for random and systematic errors. *Hydrol. Sci. J.* 55(2), 192-208.
- NERC (1975). Flood studies Report (five volumes), London, NERC.
- NVE (2011). Retningslinjer for flomberegninger (Guidelines for flood calculations). Retningslinjer no. 04/2011. 59 pp.
- Paquet, E., Garavaglia, F., Garçon, R. og Gailhard, J. (2013). The SCHADEX method: a semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation. *Journal of Hydrology*, 495:23–37.
- Petersen-Overleir A, & Reitan, T (2009). Accounting for rating curve imprecision in flood frequency analysis using likelihood-based methods. *Journal of Hydrology*, 366(1-4):89–100
- Renard, B., K. Kochanek, M. Lang, F. Garavaglia, E. Paquet, L. Neppel, K. Najib, J. Carreau, P. Arnaud, Y. Aubert, F. Borch, J.-M. Soubeyroux, S. Jourdain, J.-M. Veyssiere, E. Sauquet, T. Cipriani, and A. Auffray (2013), Data-based comparison of frequency analysis methods: A general framework, *Water Resour. Res.*, 49,

- Reis D. S., Stedinger J. R., (2005). Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information. *Journal of Hydrology*, 313, 1-2, 97-116.
- Rogger, M., B. Kohl, H. Pirkel, A. Viglione, J. Komma, R. Kirnbauer, R. Merz and G. Blöschl (2012a). Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria - Do they tell a consistent story?, *Journal of Hydrology*, 456-457, pp. 30-43
- Rogger, M., H. Pirkel, A. Viglione, J. Komma, B. Kohl, R. Kirnbauer, R. Merz, and G. Blöschl (2012b). Step changes in the flood frequency curve: Process controls, *Water Resour. Res.*, 48, W05544, doi:10.1029/2011WR011187.
- Rossi, F., Fiorentino, M. and Versace, P. (1984). Two-Component Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analysis. *Water Resources Research*, 20 (7): 847-856.
- Sayers P. B., Nathan R., Rodda, H., Tomlinson, E., Bowles, D (2014). Comparison of Flood Hazard Estimation Methods for Dam Safety - Phase 1. Published by CEATI international, Montreal, Canada.
- Sjökvist, E., Axén-Mårtensson J., Dahné, J. Köplin, N., Björck, E. Nylén, L. Berglöv, G., Tengdelius-Brunell, J. Nordborg, D. Hallberg, K. Södling, J. Berggreen-Clausen, S. (2015). Klimatscenarier för Sverige Bearbetning av RCP-scenarier för meteorologiska och hydrologiska effektstudier. KLIMATOLOGI Nr 2015-15
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M. and Foufoula-Giorgiou, E. (1993). Frequency analysis of extreme events. In: D. R. Maidment (ed.), *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, London.
- Strupczewski, W. G. · Kochanek, K. · Bogdanowicz, E. (2014). Flood Frequency Analysis supported by the largest historical flood · *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1543-1551
- Sundby, M., & Lindström, G. (1996). Beräkning av riskklass II-flöden. Vattenfall Hydropower AB, Rapportnummer 3673-1.
- Svensk Energi, Svenska Kraftnät och SveMin (2007). Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar - Nyutgåva 2015.
- Svenska Kraftnät (2001). Analysis of the floods during the summer and autumn of 2000 and the winter of 2001. Report no. 1.2001, BE 90, Stockholm, Sverige.
- Svenskt Vatten (2011). Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem. Svenskt Vatten, publikation P104.
- U.S. Army Corps of Engineers (2010). Des Moines River Regulated Flow Frequency Study, U.S. Army Corps of Engineers.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE) Omaha District (2003). Upper Mississippi River System Flow Frequency Study, Hydrology and Hydraulics Appendix F, Missouri River.

- U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2005). Stochastic Modeling of Extreme. Floods on the American River at Folsom Dam -Flood-Frequency Curve Extension. RD-48
- U.S. Bureau of Reclamation,(1999). A Framework for Characterizing Extreme Floods for Dam Safety Risk Assessment
- U.S. Bureau of Reclamation (2003). Stochastic Event Flood Model Improvements and Extreme Storm Analyses for A.R. Bowman Watershed. Dam Safety Office Report No. DSO-03-02 Department of the Interior Bureau of Reclamation
- U.S. Bureau of Reclamation (2006). Guidelines for Evaluating Hydrologic Hazards. Dam Safety Office. June 2006
- Veijalainen, N. and Vehviläinen, B.(2008). The effect of climate change on design floods of high hazard dams in Finland, Hydro. Res., 39, 465–477.
- Waylen, P., and M. Woo (1982). Prediction of annual floods generated by mixed processes, Water Resour. Res., 18(4), 1283–1286
- Wilson, D., Hisdal, H., and Lawrence, D.(2010). Has streamflow changed in the Nordic countries? - Recent trends and comparisons to hydrological projections, J. Hydrol., 394, 334-346,
- Wilson, D., Fleig, A., Lawrence, D., Hisdal, H., Pettersson, L.-E. og Holmqvist, E. (2011). A review of NVE's flood frequency estimation procedures. Technical Report 9:2011, NVE, Oslo.
- WMO (2009). Guide to Hydrological Practices Volume II 6th edition, WMO-No. 168. World Meteorological Organization, Geneva.

9 Ordlista

Begrepp	Förklaring
100-årsflöde	Vattenflöde som statistiskt sett i genomsnitt överträffas en gång per 100 år. Termen i sig ger inte ledning om det avser tillrinning eller tappning.
100-årstillrinning	Tillrinning som statistiskt sett i genomsnitt överträffas en gång per 100 år.
Aktiv dämpning	På förhand planerad och åtagen flödesdämpning.
Designnederbörd	En förbestämd nederbördssekvens som används för beräkning av hög tillrinning med en hydrologisk modell. För beräkning av tillrinning till dammar i flödesdimensioneringsklass I (Svensk energi, 2015) används regionala nederbördssekvenser över 14 dygn.
Designsnömagasin	Ett förbestämt snömagasin som används för beräkning av hög tillrinning med en hydrologisk modell. För beräkning av tillrinning till dammari flödesdimensioneringsklass I (Svensk energi, 2015) används snömagasin med återkomsttiden 30 år
HT100	Se 100-årstillrinning
Hydrologisk modell	Beräkningsprogram som förenklat beskriver hydrologin för ett område. Typiskt beräknas tidsserier av hydrologiska variabler såsom tillrinning och snömagasin, utifrån tidsserier av meteorologiska variabler såsom nederbörd och temperatur.
Naturlig flödesregim	Övergripande årskaraktäristik och årsvariation i tillrinning i ett vattendrag under naturliga förhållanden.
Observationsdata	Data från mätning
Q100	se 100-årsflöde.
Reglerad flödesregim	Övergripande årskaraktäristik och årsvariation i tillrinning i ett reglerat vattendrag.
Tappning	Utgående vatten för en sjö eller vattenmagasin.
Tillrinning	Inkommande vatten till en sjö, vattenmagasin eller en punkt i ett vattendrag.

HÖG TILLRINNING I REGLERADE VATTENDRAG

Förekomst och storlek av höga vattenflöden är viktig information för konstruktion, riskbedömning och fysisk planering i och invid vattendrag. Frekvensanalys är internationellt sett en mycket vanlig metod för beräkning av dimensionerande flöde, däribland tillrinning med 100 års återkomsttid.

Den här rapporten pekar på möjligheter och svårigheter i tekniker som kan användas för att beräkna storlek och sannolikhet för höga tillrinnande flöden till dammanläggningar. Beräkningar kan med fördel göras både med utgångspunkt från mätdata och med stöd av hydrologisk modellering som standardiserat beskriver principerna för vattenreglering.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk